

## Afvoerbepaling in uiterwaarden uit waterhoogte bepaald met LiDAR

Hoogwater Maas 2021



# Afvoerbepaling in uiterwaarden uit waterhoogte bepaald met LiDAR

## Hoogwater Maas 2021

### **Auteur(s)**

Frans Buschman

Maarten Pronk

## Afvoerbepaling in uiterwaarden uit waterhoogte bepaald met LiDAR

Hoogwater Maas 2021

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer G. Burgers
<b>Referenties</b>	KPP Versterking Onderzoek Waterveiligheid, deelproject 'Quick Reaction Force'
<b>Trefwoorden</b>	Overlaatformuleringen, obstakel, specifieke afvoer, verhang.

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.2
<b>Datum</b>	16-12-2022
<b>Projectnummer</b>	11208034-007
<b>Document ID</b>	11208034-007-ZWS-0003
<b>Pagina's</b>	50
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Frans Buschman	
	Maarten Pronk	

# Samenvatting

Het hoge water van juli 2021 in de Maas heeft geleid tot overstromingen en schade. In de bovenloop van de Maas werd de hoogste afvoer ooit gemeten. De uiterwaarden waren overstroomd. Het is mogelijk dat op trajecten een substantieel deel van de rivierafvoer werd afgevoerd door de overstroomde uiterwaarden. Omdat het moeilijk is de afvoer in een uiterwaard direct te meten, wordt de bepaling van de totale afvoer door de rivier onzeker. In de dagen rond de hoogste waargenomen afvoer, zijn met *Light Detection And Ranging* (LiDAR) opnamen gemaakt vanuit een vliegtuig. Met deze opnamen zijn de hoogte van het terrein en van het wateroppervlak gedetailleerd in kaart gebracht. Deze meetgegevens maken het mogelijk om te verkennen in hoeverre bestaande overlaatmethoden toegepast kunnen worden om afvoer door uiterwaarden te bepalen. Met deze methoden is bij acht obstakels in of op de rand van uiterwaarden de specifieke afvoer bepaald op lijnen dwars over het obstakel. Bij obstakels waar de waterdiepte op het obstakel groter dan 0,5 m was, lijkt de resulterende specifieke afvoer betrouwbaar. Voor één locatie is de totale afvoer geschat op 612 m<sup>3</sup>/s, ofwel grofweg 20% van de piekafvoer van de Maas. Bij een waterdiepte kleiner dan 0,5 m werd alleen een resultaat gevonden met de aanname van kritische stroomsnelheid. In werkelijkheid kan de stroming ook superkritisch zijn en werd de specifieke afvoer onderschat, mogelijk met een factor 2. Bij obstakels met een waterdiepte groter dan 0,5 m is de gevoeligheid van specifieke afvoer voor waterdiepte flink minder groot, en is het resultaat als plausibel beoordeeld. Deze studie geeft aan dat vooral bij obstakels met een uniforme kruinhoogte en een waterdiepte groter dan 0,5 m de totale afvoer bepaald kan worden op basis van de overlaatmethoden.

Daarnaast zijn andere toepassingen met waterhoogte uit LiDAR data verkend. Enkele van deze toepassingen zijn dat LiDAR gegevens gebruikt worden voor verificatie van hydrodynamische modellen (bijvoorbeeld voor verificatie van het langs- en dwarsverhang en het overstroomde gebied), voor het maken van een inundatiekaart van het hoge water, voor de verificatie van windgolfmodellen en voor de afname van scheepsgolfhoogte richting de oever.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Aanleiding en motivatie	7
1.2	Motivatie	7
1.3	Doel en definities	8
1.4	Hoogwater juli 2021	8
1.5	Beschikbare meetgegevens	9
1.5.1	Overzicht	9
1.5.2	Verwerking LiDAR-data	10
1.5.3	Waterhoogte uit LiDAR	10
1.5.4	Bodemligging uit LiDAR en andere bronnen	11
1.6	Aanpak en leeswijzer	12
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>14</b>
2.1	Algemeen	14
2.2	Verdronken overlaat	15
2.3	Volkomen overlaat	16
2.4	Afvoer uit verhang	17
<b>3</b>	<b>Toepassing</b>	<b>18</b>
3.1	Obstakels als volkomen overlaat	18
3.1.1	Maastricht Pietersplas	18
3.1.1.1	Keuze gegevens bodemligging	18
3.1.1.2	Details middeling en bepaling 2 locaties	21
3.1.1.3	Bepaling specifieke afvoer	23
3.1.1.4	Gevoeligheid voor meetfout	23
3.1.2	Schroevendaalseplas	24
3.1.3	Maasbracht kade	25
3.1.4	Sluisweg bij Heel	27
3.1.5	Roermond Ooldersplas	28
3.2	Obstakels als verdronken overlaat	31
3.2.1	Maasbracht	31
3.2.2	Heijen	33
3.2.3	Roermond: de Weerd	34
3.2.3.1	Ligging	34
3.2.3.2	Bepaling en gevoeligheid specifieke afvoer	35
3.3	Discussie	36
3.3.1	Plausibiliteit berekende specifieke afvoer	36
3.3.2	Beperkingen van de LiDAR-gegevens	37
<b>4</b>	<b>Overige toepassingen van waterhoogte uit LiDAR</b>	<b>39</b>

4.1	Specifieke afvoer uit verhang	39
4.2	Verbinding van overstroomde gebieden en inundatiekaart	41
4.3	Inzinking kribkop	42
4.4	Scheepsgolven en windgolven	43
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusies	45
5.2	Aanbevelingen	45
<b>6</b>	<b>Literatuurlijst</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Bijlage: begin en eindtijd van opnametijd LiDAR-punten per kaartblad (C_MAASHW2021_)</b>	<b>48</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en motivatie

In juli 2021 zijn grote delen van Limburg, delen van België en van Duitsland getroffen door hevige regenval en overstromingen. De rivierafvoer ging niet alleen door het zomerbed (hoofdgeul), maar ook door de uiterwaarden en andere overstromde gebieden. Tijdens het hoge water in de Maas van juli 2021 zijn door middel van *Light Detection And Ranging* (LiDAR) hoogtemetingen gedaan van het wateroppervlak vanuit een vliegtuig. Door combinatie met de bodemligging kan de waterdiepte bepaald worden. Met deze gegevens is het ook mogelijk een formulering voor overlaten toe te passen om de afvoer (in een uiterwaard) te bepalen bij obstakels. Bij gebrek aan een geschikte LiDAR -waterhoogte opname, heeft Schroevers (2017) deze methode toegepast door uit een berekende stroomsnelheid op enkele locaties de inzinking te bepalen. De conclusie was dat de inzinking met LiDAR te meten moet kunnen zijn. De LiDAR-data van juli 2021 maakt het mogelijk om de methode (omgekeerd) toe te passen voor gemeten waterstandsinzinking.

## 1.2 Motivatie

Wanneer een uiterwaard is overstromd, kan de rivierafvoer voor een deel door de uiterwaard gaan. In het zomerbed kan de afvoer bepaald worden door een directe meting van de stroomsnelheid, zoals met een *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), mits de condities dit toelaten. In de uiterwaard is een directe meting van stroomsnelheid vaak niet mogelijk doordat varen in de uiterwaard lastig is doordat het ondiep is en doordat begroeiing en obstakels (zoals hekken) aanwezig zijn. De ruimtelijke variabiliteit in een uiterwaard maakt dat een indirecte waarneming zoals afvoerbepaling uit waterstand niet eenvoudig is. Om deze redenen is het verband tussen waterstand en afvoer door de uiterwaard niet lineair: een schatting van afvoer op basis van waterstand zal erg onzeker zijn.

Inzicht in de afvoer in een uiterwaard is onder andere nodig om de totale rivierafvoer te kunnen bepalen. De afvoer door een uiterwaard kan substantieel zijn. Een schatting is zeer onzeker, onder andere door de ruimtelijke variabiliteit. Vooral bij extreme afvoeren, kan een foutieve inschatting van afvoer uit Q-h of Q-f relaties leiden tot een fout van ~5 % in de waterbalans bij splitsingspunten (Gensen, 2021). Meerdere afvoormeetstations in Nederland geven geen waarde uit wanneer de lokale uiterwaarden zijn overstromd. In dat geval is de afvoer te onzeker, waarvoor de fout vaak groter dan 5% wordt .

Een andere toepassing van het bepalen van de afvoer in een uiterwaard is voor de verificatie van hydrodynamische modellen. Parallel aan deze studie is een validatie van het D-HYDRO-model voor het hoogwater van juli 2021 in de Maas uitgevoerd (van der Deijl, 2022). In de rapportage van het D-HYDRO Rijntakken model wordt beschreven hoe afvoermetingen in het zomerbed op enkele locaties worden gebruikt (Niesten et al., 2022). Ter verificatie (of afregeling door bepaling van ruwheid) van de afvoerverdeling tussen zomerbed en winterbed zijn metingen nodig. Ook voor het transport van sediment en ander materiaal is het belangrijk de stroomsnelheid in een uiterwaard te kennen. Omdat een directe meting niet eenvoudig mogelijk is, verkennen we de mogelijkheid om op basis van waterhoogte uit LiDAR data specifieke afvoer te bepalen.

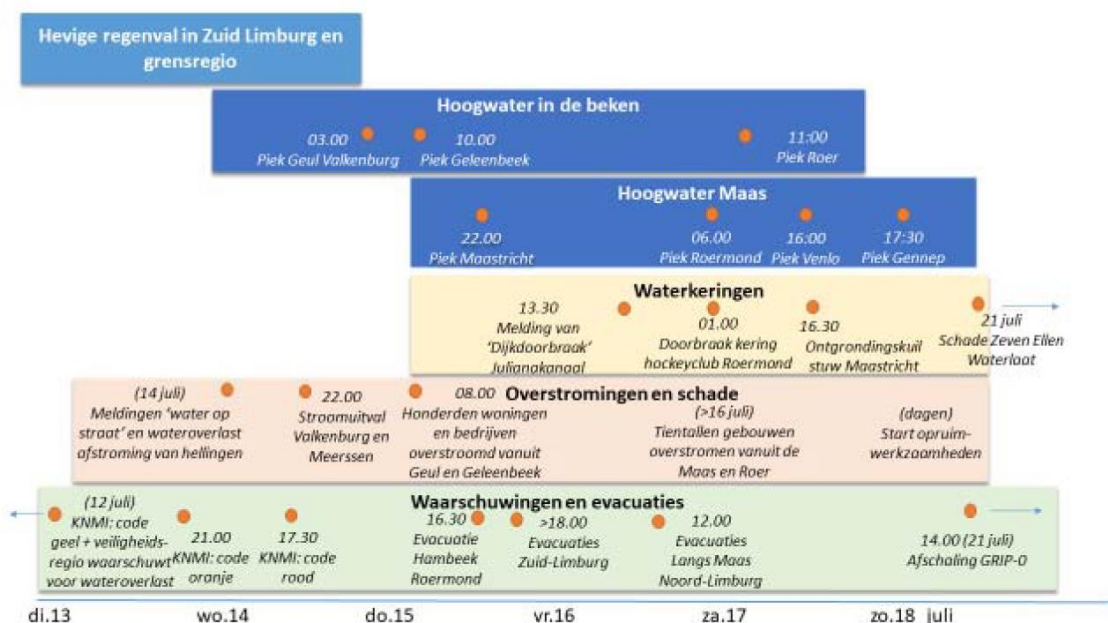
### 1.3 Doel en definities

Het doel van deze verkenning is te evalueren in hoeverre de overlaatmethoden toegepast kunnen worden om specifieke afvoer te bepalen bij obstakels in uiterwaarden op basis van LiDAR-data opgenomen tijdens het hoogwater van juli 2021. Een secundair doel is het aangeven van andere toepassingen met waterhoogte uit de LiDAR data.

**Obstakels** zijn bijvoorbeeld (veer)wegen, zomerdijken, kades of een natuurlijk hoge bodemligging (bijvoorbeeld een oeverwal). De **overlaatmethoden** maken gebruik van het feit dat de waterstand inzinkt bij een obstakel. Voor een kunstwerkoverlaat kan uit het waterstandsverschil en het verschil in bodemhoogte bij het obstakel de specifieke afvoer bepaald worden. Voor het patroon van de inzinking van de waterstand kunnen twee typen overlaten onderscheiden worden: een overlaat met **vrij verval (volkomen)** en een **verdronken (onvolkomen) overlaat**. Bij een overlaat met vrij verval is de gradiënt in het wateroppervlak bij de overlaat typisch 1-10%, terwijl deze voor een verdronken overlaat typisch kleiner is.

### 1.4 Hoogwater juli 2021

Tijdens het extreem hoge water van juli 2021 was de topafvoer van de Maas bovenstrooms de hoogste ooit gemeten (tussen 3195-3310 m<sup>3</sup>/s voor Eijsden, St. Pieter en Borgharen-dorp) in de 110 jarige reeks (Rura-AHA, 2022). Bij Megen (rivierkm 190) was de topafvoer kleiner door topvervlakking van het spitse hoogwater: 2328 m<sup>3</sup>/s (Rura-AHA, 2022). Benedenstrooms van Roermond waren de waterstanden lager dan tijdens eerdere hoogwaters, mede door de uitvoering van Maaswerken en de sterke topvervlakking die samenhang met de spitse golfvorm (ENW, 2021). Het gevolg van de overstromingen was veel schade. Figuur 1-1 toont een algemene tijdslijn.



Figuur 1-1 Algemene tijdslijn (onvolledig) met enkele kenmerkende gebeurtenissen tijdens het hoogwater in juli 2021. Bron: ENW (2021)



## 1.5 Beschikbare meetgegevens

### 1.5.1 Overzicht

Tijdens het hoogwater op de Maas van juli 2021 zijn vanuit een vliegtuig laseraltimetrie (LiDAR) en luchtfoto's ingewonnen. Het vliegtuig heeft banen gevlogen over de Maas, zodat binnen een dag of 4 een vlakdekkend beeld voor de gehele Maas beschikbaar was. De opnamen zijn bovenstrooms bij Eijsden begonnen en eindigden benedenstrooms in de Bergse Maas. Daaruit is de terreinhoogte en de waterhoogte bepaald in kaarten met een resolutie van 0,5 m. Zowel de ruwe data (LAZ-bestanden) als de verwerkte data zijn beschikbaar. De opnametijd van deze kaarten is alleen beschikbaar in de LAZ-bestanden. Ter indicatie zijn de begin- en eindtijd van opnamen per kaartbeeld aangegeven in bijlage A. Op basis van de LAZ bestanden is achterhaald, voor de locaties die zijn geanalyseerd, dat over het algemeen de opnamen binnen een dag na de hoogwaterpiek zijn genomen. Tijdens afvoercondities lager dan gemiddeld (rond 150 m<sup>3</sup>/s) in augustus 2021 is hetzelfde gebied ingewonnen. Voor beide opnamen geldt dat ze in de zomer zijn opgenomen, waardoor mogelijk minder terreinpunten te zien zijn vanwege de dichte vegetatie.

Tijdens een hoogwater worden verschillende extra metingen uitgevoerd. Vanwege grote hoeveelheden zwerfafval in de rivier, konden verschillende geplande hoogwatermetingen niet doorgaan in verband met de veiligheid. Bovendien viel het hoogwater buiten het hoogwaterseizoen, waardoor sensoren in uiterwaarden niet waren geïnstalleerd. Wel zijn Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)-metingen uitgevoerd bij Eijsden, Maastricht, Maaseik en de Clauscentrale ter verificatie van afvoermeetstations (Rura-AHA, 2022). Daarnaast zijn op hele rivierkilometers in het stuwpannd Grave afvoermetingen uitgevoerd om de verdeling over winter- en zomerbed te bepalen, zodat het WAQUA model hiermee geverifieerd kan worden. Het ontbreken van inzicht in de totale afvoer op het moment van meten maakt interpretatie van die metingen ingewikkeld (Rura-AHA, 2022). In combinatie met deze ADCP-metingen zijn ook verhanglijnmetingen uitgevoerd langs de as van de rivier.

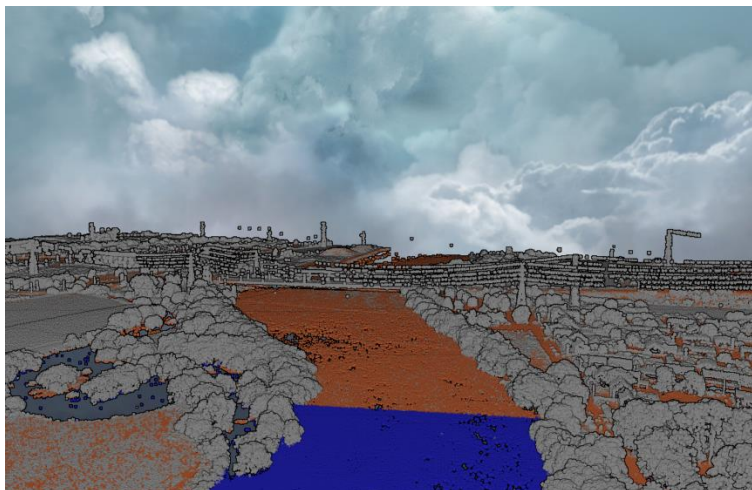
Tabel 1-1 Overzicht beschikbare meetgegevens

DatASET	Periode	Resolutie	Opmerkingen
LiDAR waterhoogte en terreinhoogte	16-19 juli 2021	0.5 m	Vluchtlijnen en tijden zijn niet beschikbaar, behalve in de ruwe data
Ruwe LiDAR-data	16-19 juli 2021	Losse punten per kaartbeeld (er zijn 81 kaartbeelden)	In de ruwe data is per punt de opnametijd bekend, en is na te gaan wat de opnametijd is van punten in een kaartbeeld <sup>1</sup>
Luchtfoto's	16-19 juli 2021	0.1 m	Het is een technische luchtfoto en resolutie is van de orthomozaïek
LiDAR terreinhoogte	11-13 augustus 2021	0.5 m	De Maasafvoer was rond 150 m <sup>3</sup> /s (meegeleverd infoblad)
Bodemligging Baseline j19_6-v2	Onbekend (hoort bij 2019)	2 m	De Baseline gegevens hebben wij geprojecteerd op een 2 m rooster. De baseline database geeft een dekkend beeld en is opgebouwd vanaf 1995 en deels geactualiseerd.
ADCP gegevens stuwpannd Grave	16 en 18 juli 2021	Raaien dwars	Doel was om de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed te bepalen
Verhanglijnmeting van Sambeek naar Grave (rivierkm 148-175)	16 en 18 juli 2021	Raai op as	Het uitvoeren van deze verhanglijnmetingen over 27 km duurde ongeveer 2 uur

<sup>1</sup> Voor meest zuidelijke kaartblad C\_MAASHW2021\_69CZ2: 16-7-2021 15:59 tot 16:09, en voor een benedenstrooms kaartblad C\_MAASHW2021\_39DZ2: 19-7-2021 10:00-14:09

### 1.5.2 Verwerking LiDAR-data

De eerste stap van de verwerking van de ruwe data is het classificeren van een punt naar terrein, water of overig (zie voorbeeld in Figuur 1-2). In het voorbeeld is de classificatie voor de meeste punten goed gegaan, alleen is een gedeelte water foutief als terrein geïdentificeerd. De tweede stap is het projecteren van de terreinpunten op een raster van terreinhoogte, en de waterpunten op een raster van waterhoogte. Deze verwerking wordt uitgevoerd per kaartblad. Op vergelijkbare manier wordt terreinhoogte bepaald voor het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), alleen worden deze vluchten meestal uitgevoerd in de winter, zodat meer terrein zichtbaar is.



Figuur 1-2 een artistieke weergave van een deel van de LiDAR puntenwolk met bruin=terrein, blauw=water en grijs=overig. Credits: Fedor Baart

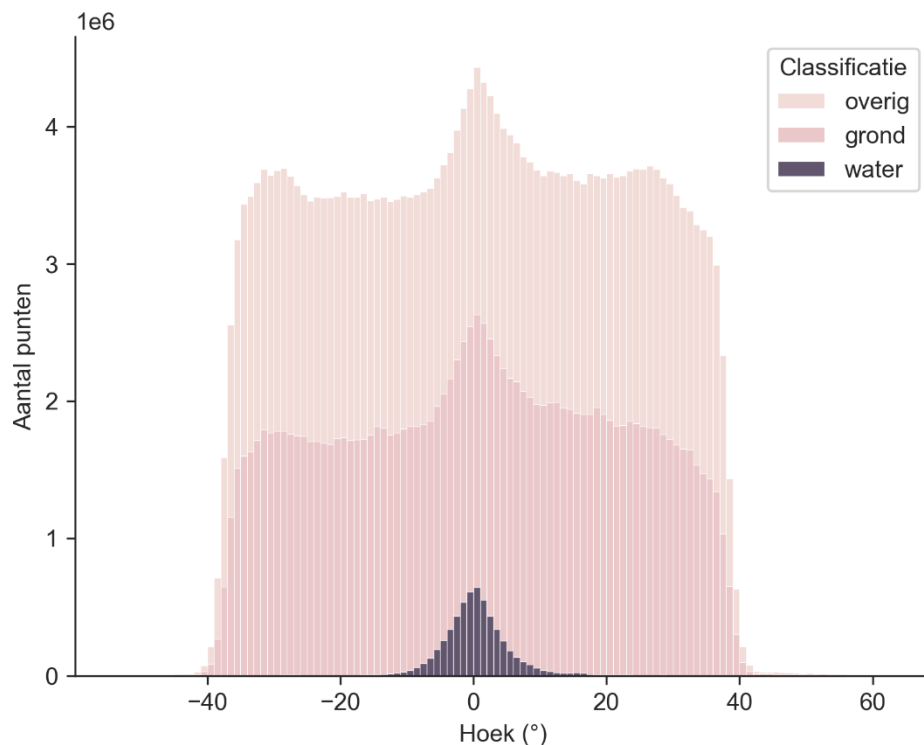
### 1.5.3 Waterhoogte uit LiDAR

Waterhoogte meten met LiDAR is een relatief onbekende techniek, maar wordt al enige jaren toegepast, zie o.a. Hopkinson et al. (2011) en Vernimmen et al. (2020). Zeer recent meet men zelfs verhang van waterlichamen met LiDAR instrumenten vanuit de ruimte (Scherer, 2022). Deze hoogtemetingen vanuit ICESat-2 hebben een fout in de orde van centimeters. Een nadeel is dat de hoogtemetingen in smalle banen worden gemeten die maar net over een waterlichaam moet vallen. LiDAR data uit vliegtuigen heeft een veel grotere dekking dan vanuit de satelliet. In Nederland zijn proeven uitgevoerd met LiDAR data van het AHN3, waarmee succesvol de waterstand van oppervlaktewateren gemeten door waterschappen is gereproduceerd.

Voor waterhoogte metingen zijn er ten opzichte van de gangbare terreinhoogte metingen met LiDAR enkele belangrijke verschillen. Water gedraagt zich meer als een spiegel dan de diffuse weerkaatsing op terrein. Afhankelijk van het instrument wordt er normaal gemeten tot een hoek van +/-40 graden t.o.v. recht onder het vliegtuig, maar in de LiDAR data van 16-19 juli 2021 zijn er watermetingen tot 10 graden, en zijn verreweg de meeste waterhoogtes ingemeten binnen 5 graden (Figuur 1-3). Hierdoor zijn de waterhoogtes niet vlakdekkend ingemeten, maar zijn zichtbaar als lange banen die het traject van het vliegtuig representeren. Een deel van het wateroppervlak is dus niet gemeten.

Een ander belangrijk verschil tussen terrein en waterhoogte metingen met LiDAR is de dynamiek van het te meten object. De waterhoogte kan variëren in de tijd tussen metingen van enkele minuten (de volgende ingevlogen baan) tot maximaal dagen (de volgende aansluitende vlucht). De meeste topografie is als statisch te beschouwen, waardoor dit geen probleem oplevert, maar voor wateroppervlak kan dit een probleem zijn. Zo zijn in het AHN3 bijvoorbeeld harde overgangen in waterhoogte zichtbaar.

In de hier gebruikte datasets zijn deze overgangen minder zichtbaar, omdat de “banen” niet op elkaar aansluiten, maar elke baan is dus op een ander tijdstip ingemeten en bevat als zodanig mogelijk andere patronen.



Figuur 1-3 Cumulatief histogram van het aantal LiDAR punten in kaartblad 39DZ2 afgezet tegen de hoek van de laserstraal (gezien vanuit het vliegtuig). Terreinpunten en overige (vegetatie) punten zijn evenredig ingemeten onder alle hoeken, maar watermetingen hebben een duidelijke piek rond 0 graden.

In de infobladen van de ingewonnen LiDAR data is de systematische fout opgegeven als 0,05 m. Dat wil zeggen dat de absolute gemeten hoogtes consistent niet meer dan 0,05 m afwijken van een referentiemeting. Naast een systematische fout bevatten de LiDAR hoogtemetingen ook een stochastische fout; een normaal verdeelde willekeurige fout. Deze is opgegeven als 0,10 m (1 sigma). In tegenstelling tot de systematische fout kunnen we deze wel controleren. We hebben hiervoor gekeken naar de spreiding van de LiDAR waterhoogtedata binnen 1 m<sup>2</sup> cellen voor een gegeven kaartblad. Gemiddeld zien we een spreiding van 0,03 m bij een gemiddelde van 5 punten per cel. Gegeven dat het wateroppervlak binnen zo'n cel niet perfect vlak is geeft dit aan dat de stochastische fout zeer klein is. Door het projecteren op roosters (het aggregeren van punten) wordt deze fout nog kleiner. In de overlaatsmethode moet dus rekening gehouden worden met een maximale systematische plus stochastische fout van 0,15 m en is het mogelijk dat er sprongen in waterhoogte voorkomen, doordat de waterhoogte is veranderd tussen vluchtlijnen door.

#### 1.5.4 Bodemligging uit LiDAR en andere bronnen

De terreinhoogte zoals ingewonnen vanuit LiDAR is minstens zo betrouwbaar als de waterhoogte, onder andere vanwege een groter aantal punten dat is ingemeten op land (Figuur 1-3).

Baseline is een database met gebiedsinformatie die relevant is voor het opzetten en onderhouden van hydrodynamische modellen.

Baselinedatabases zijn initieel opgezet op basis van gegevens ten tijde van de hoogwaters van 1993 en 1995. Vervolgens zijn deze databases geactualiseerd met behulp van zogeheten maatregelen, door nieuwe (ingemeten) data toe te voegen zowel vanuit DTB (Digitaal Topologisch Bestand) als uit lodingen. In Baseline is dus ook terreinhoogte beschikbaar.

De terreinhoogte is een combinatie van peilingen vanaf het water, peilstokmetingen en LiDAR-terreinhoogte. Welke gegevens van welke opname zijn opgenomen in Baseline is niet bekend. Een voordeel van Baseline is dat gegevens vlakdekkend zijn en dat objecten of grote hoogteverschillen ingetekend zijn als hoogteverschillijn, breuklijnen, kades of kribben (hoogtes van kades en kribben zitten niet meer in het officiële hoogtebestand, maar wel in een versie voor analyse). De verwerking van metingen tot Baseline-data maakt de bodem gladder. De terreinhoogte uit LiDAR (laagwater in augustus 2021) toont meer detail, maar is niet geheel vlakdekkend. In de overlaاتمethode zal het gebruik van bodemhoogte uit LiDAR-data resulteren in meer variatie in de profielen dan bij gebruik van Baseline-data. We gebruiken in principe de LiDAR-data in deze studie.

## 1.6 Aanpak en leeswijzer

De LiDAR gegevens van juli en augustus 2021 maken het mogelijk om de overlaاتمethoden toe te passen en te evalueren. De theorie en geldigheid van de versimpelde overlaatformuleringen is samengevat in hoofdstuk 2, op basis van handboeken, een relevant proefschrift (Ali, 2013) en Schroevers (2017). Idealiter zijn de resultaten te vergelijken met directe metingen, maar ter plaatse van de beschikbare ADCP-metingen zijn geen obstakels in de uiterwaarden aangetroffen. Bij gebrek aan validatiemetingen kunnen we in deze verkenning alleen beoordelen of een gevonden specifieke afvoer plausibel kan zijn.

Hoofdstuk 3 beschrijft de toepassing van de overlaatformuleringen. Als eerste is gezocht naar obstakels in uiterwaarden die als overlaat fungeren, waar ook waterhoogte beschikbaar is. Hierbij zijn hoogteverschillijnen en breuklijnen (voor het terrein, uit Baseline) gebruikt: wanneer een hoogteverschillijn of breuklijn dwars op een ondergelopen uiterwaard loopt, is dat een potentieel obstakel dat gezien kan worden als overlaat. Met de land-water grens bepaald bij de LiDAR-opname van juli 2021 kon visueel bepaald worden welk deel van het obstakel overstromd was. Op de luchtfoto's van juli 2021 is gekeken of karakteristieken van een overlaat zichtbaar zijn, zoals een watersprong.

In de stroomrichting (dwars op het obstakel) zijn profielen getrokken in QGIS 3.16.3 (profile tool). Op deze profielen is waterhoogte en bodemligging iedere 0,5 m geprojecteerd. Waterdiepte is uiteindelijk bepaald met de LiDAR terreinhoogte van augustus 2021. De hoogte voor laaggelegen punten (niet droog tijdens augustus 2021) is indien nodig bepaald met Baseline-dat. Deze profieldata is bewerkt in Matlab R2021b, waarmee ook de specifieke afvoer op basis van de overlaatformuleringen is bepaald. Aan de hand van het waterstandsprofiel is ingeschat of er ofwel sprake was van een vrij verval nabij het obstakel, passend bij een volkomen overlaat, of sprake was van een obstakel die tijdens de LiDAR-vlucht verdronken was. Details van de gevolgde methode worden toegelicht met figuren bij de eerste toepassing (Maastricht Pieterplas).

Om de robuustheid van de methoden te bepalen, hebben we voor enkele voorbeelden meerdere profielen naast elkaar gelegd en hebben we uitkomsten vergeleken. Daarnaast hebben we het effect van de maximale fout in waterstand in de LiDAR data bepaald met gevoeligheidsanalyses. Tot slot, bediscussiëren we de plausibiliteit en bruikbaarheid van de resultaten.

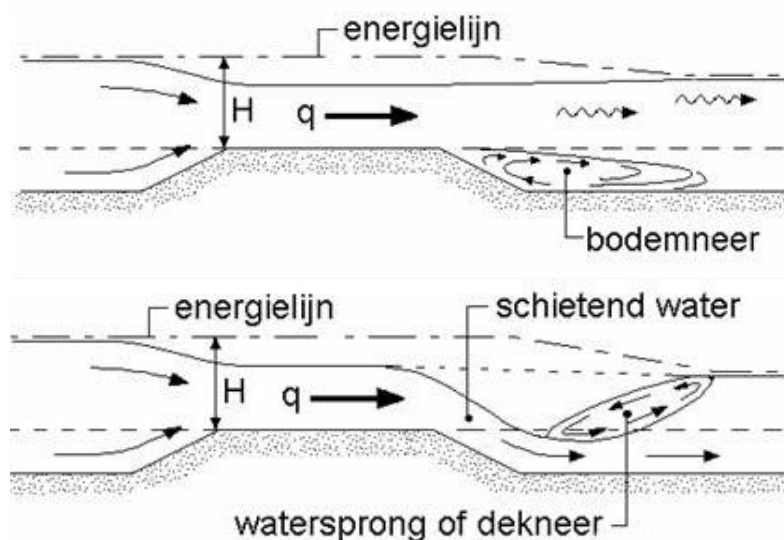
Overige toepassingen zijn beschreven in hoofdstuk 4 aan de hand van inzichten en figuren die we tegen kwamen. Vermoedelijk zijn er meer toepassingen waarvoor waterhoogte uit LiDAR-data relevant kan zijn.

## 2 Theorie

### 2.1 Algemeen

Tijdens een hoogwater overstromen uiterwaarden en kan water door de uiterwaarden stromen. Welk deel van de rivierafvoer door de uiterwaarden stroomt hangt onder andere af van de bodemgeometrie, zoals de aanwezigheid van nevengeulen. Ook de weerstand in de uiterwaard en in de hoofdgeul speelt een belangrijke rol. De weerstand wordt in de hoofdgeul grotendeels bepaald door bodemvormen en in de uiterwaard door obstakels (Ali, 2013). Bovendien geeft de bodemruwheid een weerstand en beïnvloeden bomen en struikgewas de stroming lokaal. Voor de verdeling van de rivierafvoer over de hoofdgeul en over de uiterwaarden tijdens een hoogwater is het energieverlies dat optreedt bij obstakels in de uiterwaard van belang.

Op de kruin van obstakels en overlaten treedt een lokale versnelling op en (daardoor) een verlaging van de waterstand (Figuur 2-1). Er zijn twee typen overlaten. Bij een verdronken overlaat vertraagt de stroming na het passeren van de kruin (Figuur 2-1 boven), terwijl bij een volkomen overlaat de waterstand en afvoer op de kruin niet afhangen van de waterstand benedenstrooms (Figuur 2-1 onder). Bij een volkomen overlaat is sprake van vrij verval en in die zone kan de stroming superkritisch (schietsend; ofwel het Froude getal is groter dan 1) zijn. Voor beide typen overlaten zijn fundamentele fysische balanswetten opgesteld voor een controlevolume voor massa, impuls en energie. Voor de bovenstroomse en benedenstroomse zijde van het controlevolume wordt een constante waterdiepte en stroomsnelheid verondersteld in de breedte. Dit betekent dat het controlevolume klein is ten opzichte van de grootschalige waterbeweging en groot ten opzichte van de lokale processen bij de overlaat.



Figuur 2-1 Schematische dwarsdoorsnede van stroming over een verdronken lange overlaat (boven) en over een volkomen overlaat waarbij de waterstand op de overlaat niet wordt beïnvloed door de waterstand benedenstrooms van de overlaat (onder).

Voor een obstakel waar de stroming onder bepaalde condities vergelijkbaar is aan die bij een overlaat kunnen op een zelfde manier voor een controlevolume formuleringen worden afgeleid.

Voor zowel een overlaat als een dergelijk obstakel treedt energieverlies vooral benedenstrooms van de overlaat op, waar de stroming kan loslaten van de bodem en recirculatie kan optreden (Figuur 2-1). Bovenstrooms en op de overlaat is het energieverlies over het algemeen beperkt, en is de stroming parallel aan de bodem gericht. Hierdoor kan aan de bovenstroomse zijde tot en met de overlaat een energiebalans worden toegepast in combinatie met de massabalans om de specifieke afvoer of waterstand te bepalen. Bij dergelijke afleidingen, wordt aangenomen dat de stroming stationair en wrijvingsloos is. Bovendien wordt onsamendrukbaarheid aangenomen, wordt de hydrostatische druk aanname gebruikt en zijn de stroomlijnen over de overlaat recht verondersteld. Deze aannames lijken over het algemeen geldig gedurende een hoogwatersituatie bij obstakels met overlaatgedrag (Ali, 2013).

## 2.2 Verdrongen overlaat

Voor een onvolkomen overlaat, of obstakel waar de stroming zich gedraagt als bij een verdrongen overlaat, geldt voor de waterkolom van bovenstrooms tot en met de benedenstroomse zijde van de kruin behoud van massa (Figuur 2-2):

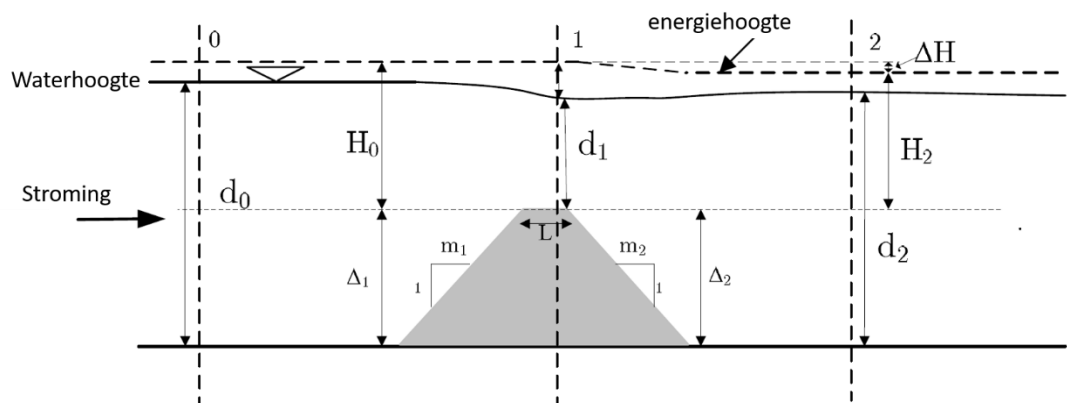
$$q = d_0 v_0 = d_1 v_1 \quad (1.1)$$

En voor het behoud van energie geldt met de genoemde vereenvoudigingen dat de som van waterhoogte en de snelheidshoogte gelijk blijven (Figuur 2-2):

$$d_0 + \frac{v_0^2}{2g} = d_1 + \Delta_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1.2)$$

Waarbij:

- $q$  de afvoer per eenheid van breedte ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\Delta_1$  de hoogte van de overlaat (m)
- $d$  de waterhoogte vanaf de bodem op locaties 0, 1 en 2 (m)
- $H$  de energiehoogte op locaties 0, 1 en 2 (m)
- $v$  de stroomsnelheid gemiddelde over de diepte op locaties 0, 1 en 2 (m/s)
- $L$  de lengte van de overlaat (m)
- $m_1$  de lengte die de helling van de overlaat bepaalt aan de bovenstroomse zijde (m)
- $m_2$  de lengte die de helling van de overlaat bepaalt aan de benedenstroomse zijde (m)
- $g$  de gravitatie constante ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).



Figuur 2-2 Definities op doorsnede 0 bovenstrooms van de overlaat en op doorsnede 1 op het uiteinde van de overlaat (doorsnede 2 wordt niet gebruikt in de voorliggende studie); Bron: Ali (2003)

Door combinatie en aanname van geen energieverlies kan voor de specifieke afvoer als functie van de waterdiepte en hoogte van de overlaat de volgende vergelijking gevonden worden:

$$q = v_0 d_0 = d_0 d_1 \sqrt{\frac{2g(d_0 - d_1 - \Delta_1)}{d_0^2 - d_1^2}} \quad (1.3)$$

Merk op dat  $d_0 - d_1 - \Delta_1$  gelijk is aan het waterstandsverschil over de twee locaties, welke grotendeels bepaald zal worden door de verlaging van de waterstand boven de overlaat. Merk daarnaast op dat in vergelijkingen (1.2) en (1.3) niet wordt gecorrigeerd voor niet-uniformiteit van de stroming in de dwarsdoorsnede. Dit is redelijk voor het smal gekozen controlevolume, terwijl voor een volledige doorsnede een correctie van de snelheidshoogte wel nodig is (Chaudry, 2008). Ter indicatie is de coëfficiënt die hiervoor corrigeert voor een natuurlijke waterloop ongeveer 1.15-1.5 en voor een overstroomde riviervallei met grotere verschillen in diepte maximaal 1.5-2.0 (Chow, 1959; Chaudry, 2008).

Verder houdt vergelijking (1.3) geen rekening met een eventuele stromingscomponent parallel aan de overlaat. Deze component blijft parallel aan de overlaat vergelijkbaar en speelt een kleine rol in het energieverlies over de gehele overlaat (Ali, 2013). We veronderstellen dat de stroomsnelheid dwars op de overlaat met rechte stroomlijnen ook het meest bepalend is voor het waterstandsverloop van bovenstrooms tot het eind van de overlaat (locaties 0 en 1, Figuur 2-2). De aanname voor vergelijking (1.3) van geen energieverlies lijkt een redelijke aanname wanneer de helling niet te steil is ( $m_1$  in Figuur 2-2 is bijvoorbeeld minstens 3). Ondanks deze vereenvoudigingen, bepalen we de specifieke afvoer bij verdronken obstakels met vergelijking (1.3).

## 2.3 Volkomen overlaat

Bij een volkomen overlaat (Figuur 2-1 onder) versnelt de stroming van bovenstrooms naar de kruin van de overlaat tot kritisch. Vervolgens versnelt de stroming verder onder invloed van het vrije verval tot superkritisch en wordt pas weer subkritisch benedenstrooms van de watersprong. De locatie waar de stroming precies kritisch is hangt af van de waterdiepte. Daarmee, en met dezelfde aannamen als voor een verdronken overlaat, is de snelheidshoogte op locatie 1 voor een voldoende lange volkomen overlaat de helft van de waterdiepte en geldt (Chaudry, 2008; voor definities zie Figuur 2-2):

$$h_1 = \frac{2}{3} H_0 \quad (1.4)$$

De specifieke afvoer is dan met gebruikmaking van de waterdiepte bovenstrooms (locatie 0):

$$q = v_0 d_0 = d_0 \sqrt{3g d_1 - 2g(d_0 - \Delta_1)} \quad (1.5)$$

Wanneer het waterstandsverschil tussen locaties 0 en 1 groot is ten opzichte van de waterdiepte, kan de stroming superkritisch zijn en kan vergelijking (1.5) resulteren in een imaginair getal. In dat geval kan de specifieke afvoer bepaald worden op basis van de waterdiepte op het eind van de overlaat (locatie 1), ervan uitgaande dat precies daar de stroomsnelheid kritisch is:

$$q = d_1^{3/2} \sqrt{g} \quad (1.6)$$



Gezien de kleine waterdiepte bij kritische stroomsnelheid en omdat een obstakel in de uiterwaarden mogelijk niet lang genoeg is om tot de kritische waterdiepte te komen, is de verwachting dat vergelijking (1.5) een nauwkeuriger schatting oplevert dan vergelijking (1.6). Bij toepassing hiervan is het belangrijk te evalueren of de bodemligging over het obstakel voldoende lang constant is, zodat een (super)kritische stroomsnelheid kan ontwikkelen. We bepalen de specifieke afvoer met vergelijking (1.5), en passen vergelijking (1.6) alleen toe als het resultaat van vergelijking (1.5) imaginair is. Voor deze verkenning gaan we ervan uit dat een obstakel ofwel verdronken of volkomen is, terwijl een combinatie met een afvoer die tussen beide in ligt ook mogelijk is.

## 2.4 Afvoer uit verhang

Voor een rechthoekig kanaal met stationaire stroming en een kleine bodemgradiënt kan de stroomsnelheid worden bepaald met de vergelijking van Manning:

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1.7)$$

Waarbij:

- $U$  de dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
- $n$  de Manning ruwheidscoëfficiënt (s/m<sup>1/3</sup>)
- $R$  de hydraulische straal, ofwel natte doorsnede gedeeld door de natte omtrek (m)
- $S$  de waterstandsgradiënt (-).

De afvoer, voor bijvoorbeeld een riviertak, kan met vergelijking (1.7) bepaald worden door te vermenigvuldigen met de breedtegemiddelde waterdiepte en de breedte, beide gemiddeld over het beschouwde traject. Door het beschouwde traject zo lang mogelijk te kiezen, kan over meer waterstandspunten worden gemiddeld en wordt de afvoerbepaling nauwkeuriger.

## 3 Toepassing

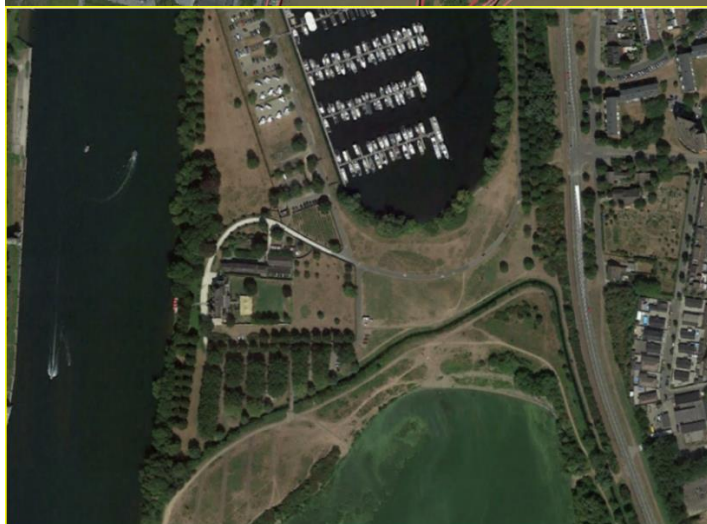
### 3.1 Obstakels als volkomen overlaat

#### 3.1.1 Maastricht Pietersplas

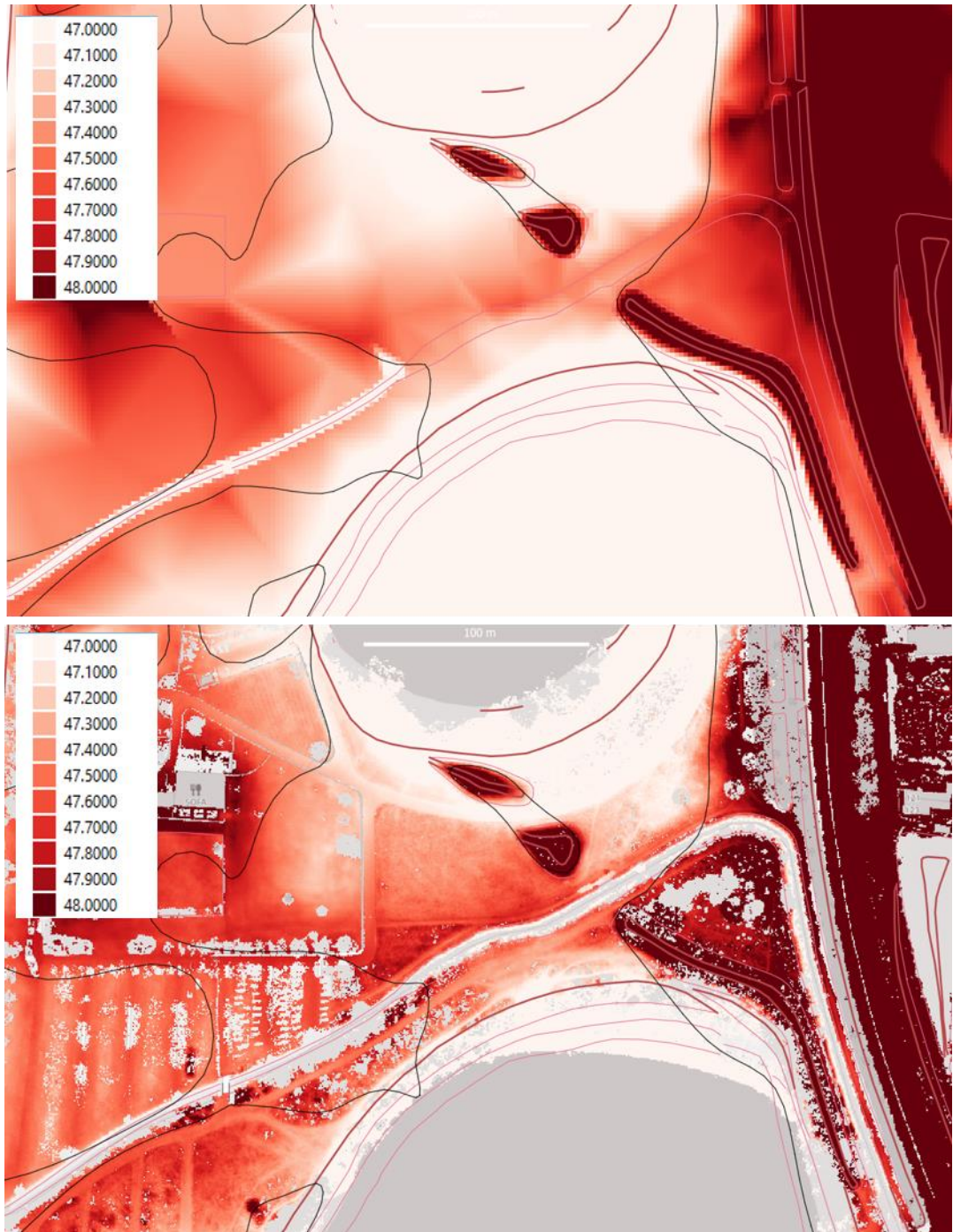
##### 3.1.1.1 Keuze gegevens bodemligging

Het meest zuidelijke obstakel dat als volkomen overlaat kan worden gezien ligt ten zuiden van Maastricht, waar water over een obstakel stroomde parallel aan de hoofdtak naar de Pietersplas (Figuur 3-1). Op het obstakel liggen meerdere wegen en paden en een sloot. In de Pietersplas ligt de Maastricht Marina. De bodemligging volgens de actuele Baseline schematisatie laat zien dat de bodemligging ongeveer 36 m+NAP is bovenstrooms van het obstakel en op het obstakel ongeveer 47 m+NAP. Het hoogste punt van het overstroomde obstakel was een weggetje direct ten noorden van de sloot (Figuur 3-1 midden). In Figuur 3-1 boven en onder is de sloot te herkennen aan de twee parallel lopende breuklijnen. De breedte van het overstroomde deel van het obstakel was 88 m op het moment van de vlucht in juli 2021.

Er zijn twee bodemliggingen beschikbaar. De LiDAR bodemligging is niet volledig dekkend en vertoont meer variatie dan de Baseline bodemligging (Figuur 3-2). In deze detailfiguur is alleen de variatie in de bodemligging rond de top van het obstakel weergegeven, zodat zichtbaar is dat de top (het weggetje) volgens LiDAR hoger ligt. De bodemligging op de top van het obstakel is volgens Baseline structureel lager (0,1 tot 0,3 m) dan de bodemligging op basis van LiDAR die zijn bepaald tijdens laag water in augustus 2021 (zie ook Figuur 3-3 midden). De variatie in de LiDAR gegevens komt in dit geval, en ook bij andere profielen, goed overeen met de luchtfoto's. Om deze reden is de bodemligging uit de LiDAR-opname van augustus gebruikt voor alle locaties en profielen om specifieke afvoer te bepalen.



Figuur 3-1 Luchtfoto van juli 2021 met hoogteverschillen uit baseline-maasj19\_6-v2 (boven), een satellietopname van augustus voor het gele kader boven, waarop wegen en een sloot zichtbaar zijn (midden) en bodemhoogte volgens Baseline geprojecteerd op een 2 m grid (onder). De zwarte lijn is de land-water grens op basis van de LiDAR-meting van juli 2021. Data is ingewonnen op 16/07/2021.

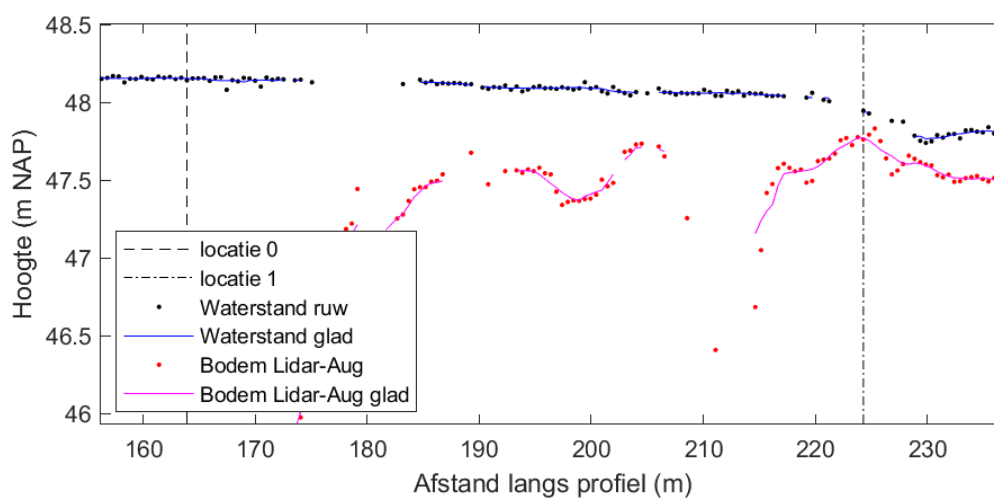
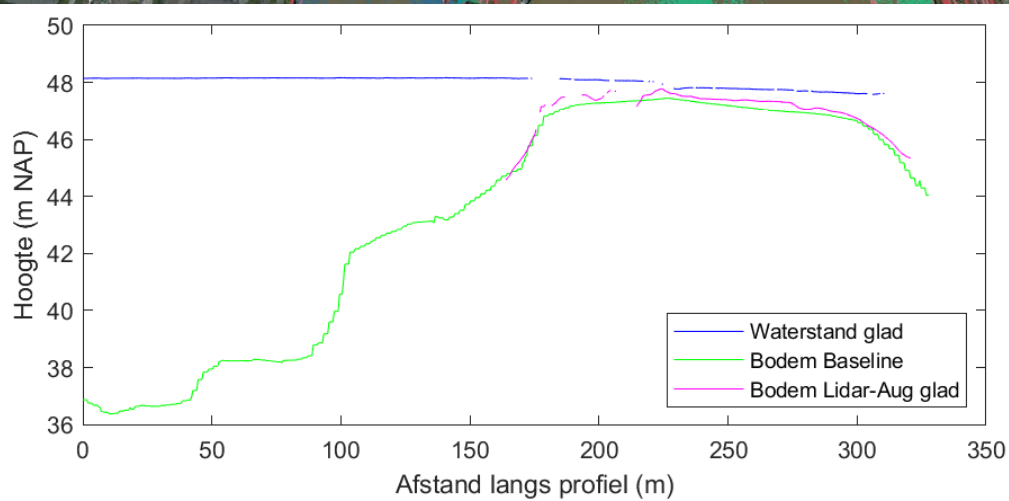
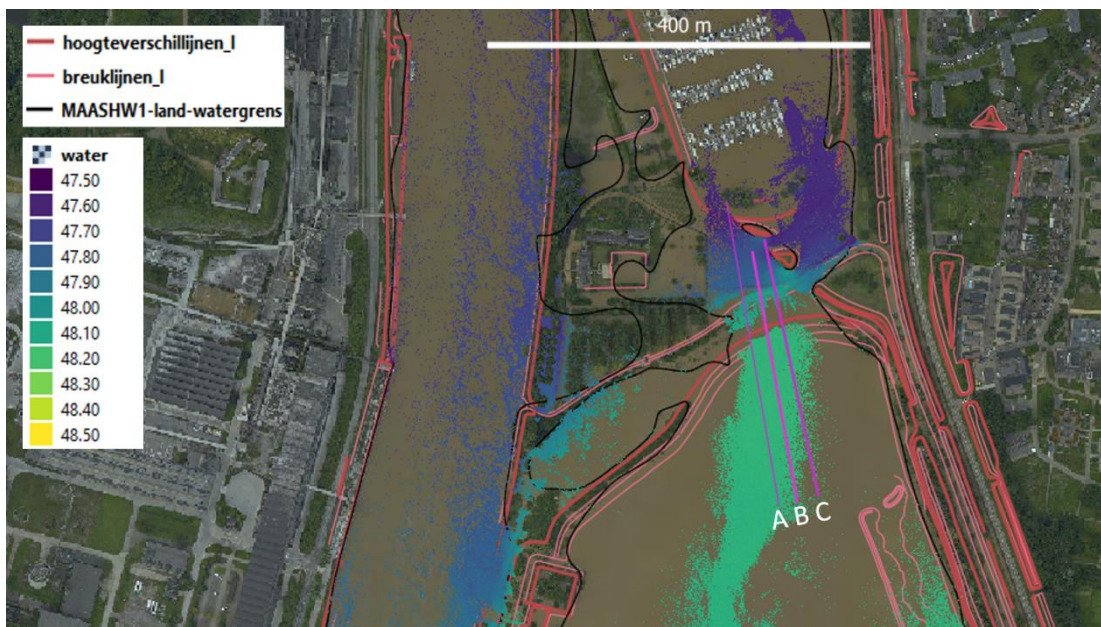


*Figuur 3-2 Bodemligging voor de top van het obstakel op basis van Baseline j19\_6-v2 (boven) en op basis van de LiDAR opname van augustus 2021 met als achtergrond een grijze topografische kaart (onder).*

### 3.1.1.2 Details middeling en bepaling 2 locaties

Voor drie profielen dwars op het overstroomde weggetje is de specifieke afvoer bepaald (Figuur 3-3). Daarbij zijn verschillende keuzes gemaakt. De LiDAR-gegevens hebben een resolutie van een 0,5 m en zijn geprojecteerd met de *Profile Tool* van QGIS op ieder profiel met een resolutie van 0,5 m. Om de ruis te reduceren zijn de profielen glad gestreken door een lopend gemiddelde over een *window* van in totaal 7 punten (3,5 m) toe te passen. Om niet te veel gaten in de geprojecteerde gegevens te krijgen nabij een punt *zonder waarde*, is er voor gekozen dat een waarde wordt berekend wanneer minstens één punt binnen het *window* een waarde heeft. Het resultaat van deze middeling is goed zichtbaar in Figuur 3-3 onder. Middelen over een groter *window* kan ertoe leiden dat de bodemhoogte op de top van het obstakel niet meer representatief is en dus een onjuiste specifieke afvoer wordt bepaald.

De specifieke afvoer is bepaald op basis van locaties 0 en 1. De locatie van 1 is bepaald op het profiel met de hoogste bodemligging of enkele meters stroomafwaarts, als daar geen LiDAR-waterhoogte beschikbaar was. Locatie 0 is initieel gekozen op 100 m bovenstrooms van locatie 1 en indien nodig opgeschoven richting locatie 1 zodat bodemligging gegevens beschikbaar zijn. Hierdoor kan de afstand tussen locatie 0 en 1 veranderen per profiel.



Figuur 3-3 Drie profielen, LiDAR-waterhoogte en luchtfoto (boven) profiel langs gehele lijn A voor waterhoogte, bodemhoogte uit Baseline en bodemhoogte uit LiDAR van augustus 2021 (midden) en voor het gedeelte dichtbij het obstakel waarover specifieke afvoer is bepaald (onder).

### 3.1.1.3 Bepaling specifieke afvoer

Op basis van de kleine waterdiepte boven het weggetje (0,3 m of kleiner) en het waterstandsverloop is bepaald dat dit obstakel een volkomen overlaat zal zijn. De specifieke afvoer is bepaald volgens vergelijking (1.5), behalve wanneer dit een imaginair getal opleverde. In dat geval is de specifieke afvoer met vergelijking (1.6) ingeschat met de aanname dat de kritische stroomsnelheid optreedt bij locatie 1 (Tabel 3-1). Het waterstandsverschil tussen locatie 0 en locatie 1 is een maat voor de inzinking nabij het obstakel. Deze methode is voor alle volkomen overlatten toegepast.

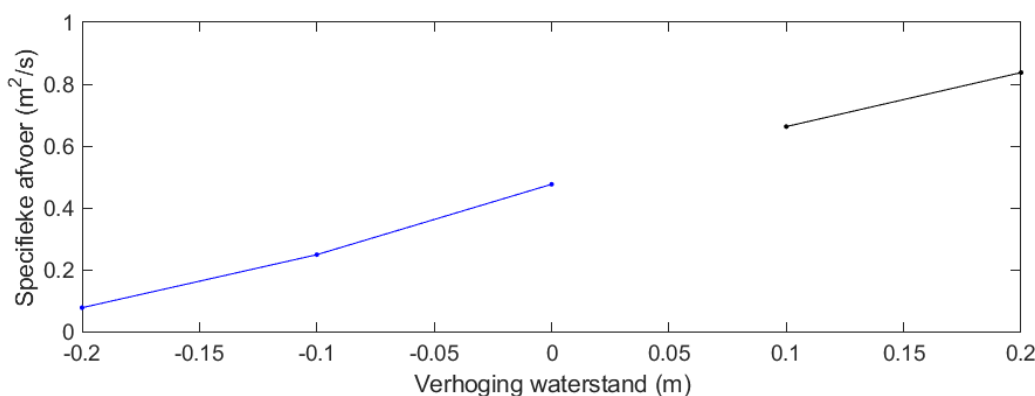
Voor alle drie profielen bij Maastricht Pietersplas leverde vergelijking (1.5) een imaginair resultaat, en is vergelijking (1.6) toegepast. De waterdiepte bij locatie 1 is het grootst bij profiel B en daardoor is ook de specifieke afvoer het grootst. Om na te gaan wat de aanname van kritische stroming betekent, is de stroomsnelheid op locatie 1 berekend. Voor profiel B is dit 1.7 m/s. De totale afvoer over dit obstakel van 88 m breed is ingeschat op basis van middeling van de drie gevonden specifieke afvoeren en is ca. 34 m<sup>3</sup>/s.

Tabel 3-1 Resultaat voor drie profielen Maastricht Pietersplas. Data is ingewonnen op 16/07/2021.

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	d <sub>1</sub> (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)
A	(1.6)	60.4	0.16	0.2	0.21
B	(1.6)	60.0	0.29	0.15	0.48
C	(1.6)	65.0	0.24	0.21	0.37

### 3.1.1.4 Gevoeligheid voor meetfout

Over het algemeen heeft de waterhoogte bepaald met LiDAR een maximale fout van ongeveer 0,15 m. Ook in de bodemligging kan een fout aanwezig zijn. Om deze reden hebben we voor profiel B de gevoeligheid bepaald voor het in stapjes verkleinen en vergroten van de waterdiepte tot 0,2 m (Figuur 3-4). Bij een toename van de waterdiepte vanaf 0,1 m was de stroming volgens de veronderstellingen subkritisch en is daarom de specifieke afvoer bepaald als voor een verdronken overlaat (vergelijking 1.3). In dit geval, uitgaande van hetzelfde waterstandsverschil, neemt de specifieke afvoer met ruim 70% toe of af bij verhoging of verlaging van de waterdiepte. De relatieve gevoeligheid is dus aanzienlijk.

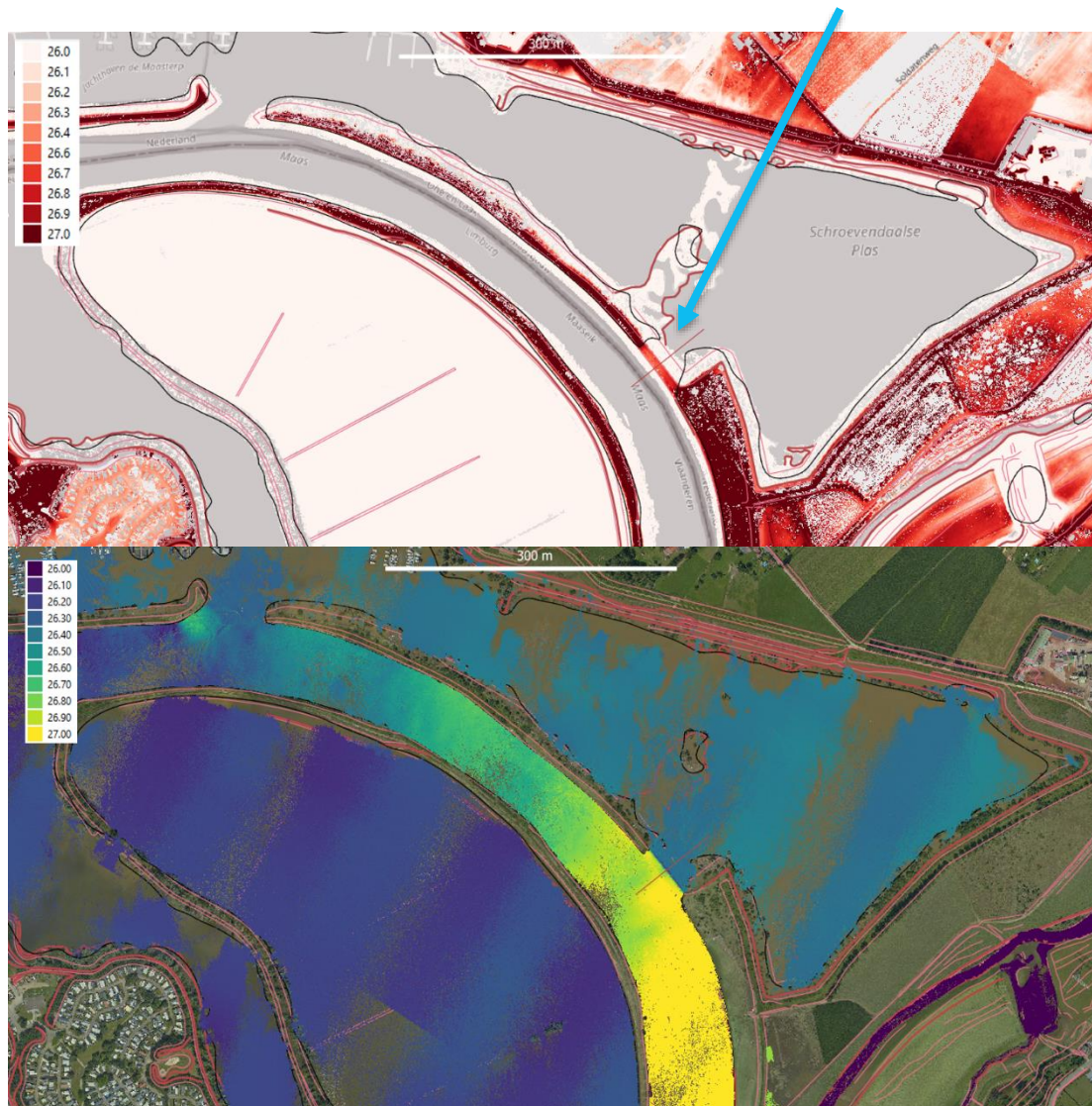


Figuur 3-4 Gevoeligheid van de resulterend specifieke afvoer voor de waterdiepte. Blauw: op basis van vergelijking (1.6) Zwart: op basis van vergelijking (1.3).

### 3.1.2 Schroevendaalseplas

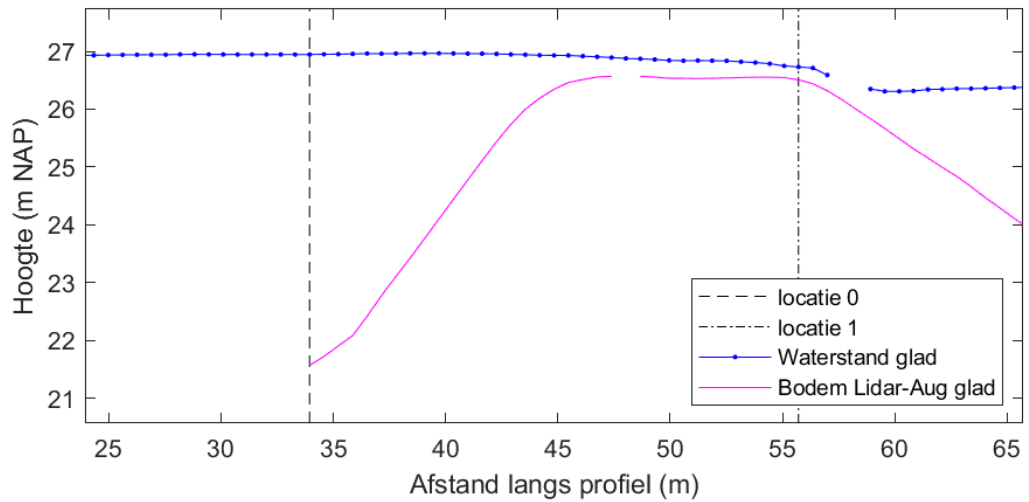
Bij Echt ligt ten noorden van de Maas de Schroevendaalseplas. Tijdens het hoge water stroomt water over een breedte van ongeveer 57 m over een constructie die de Schroevendaalse plas afschermt (Figuur 3-5). Ter plaatse dekt de LiDAR-waterhoogte dit gebied goed (Figuur 3-5).

Het profiel toont dat het obstakel een gelijkmatige stijging en een horizontaal talud heeft (Figuur 3-6). Locatie 1 is in dit geval handmatig op de noordkant van het obstakel gelegd, waar het obstakel net lager ligt dan op het hoogste punt. Zowel de waterdiepte als het verval zijn 0,22 m (Tabel 3-2), waarmee de specifieke afvoer volgens vergelijking (1.5) imaginair is. De specifieke afvoer is daarom bepaald met vergelijking (1.6).



Figuur 3-5 Bodemligging voor profiel van de Maas naar de Schroevendaalseplas uit LiDAR van augustus 2021 (boven) en luchtfoto van juli 2021 met waterhoogte uit LiDAR juli 2021 (onder). Data is ingewonnen op 17/07/2021 13:04.





Figuur 3-6 Waterhoogte en bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 voor het profiel rond het obstakel.

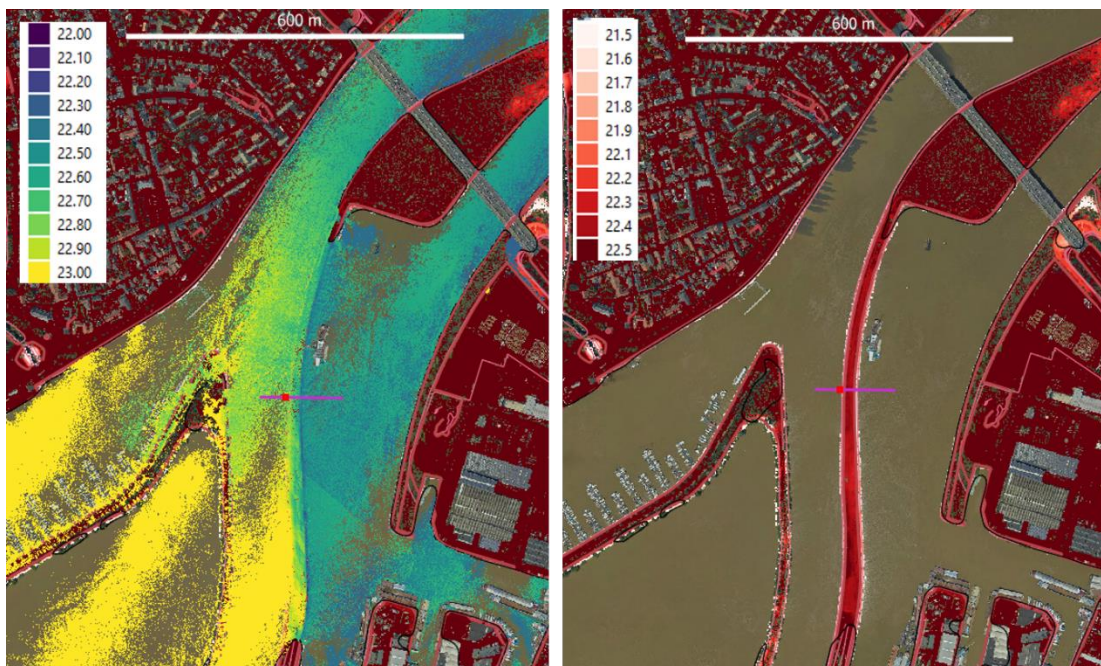
Tabel 3-2 Resultaat voor Schroevendaalseplas Data is ingewonnen op 17/07/2021 13:04.

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	d <sub>1</sub> (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)
A	(1.6)	21.77	0.22	0.22	0.33

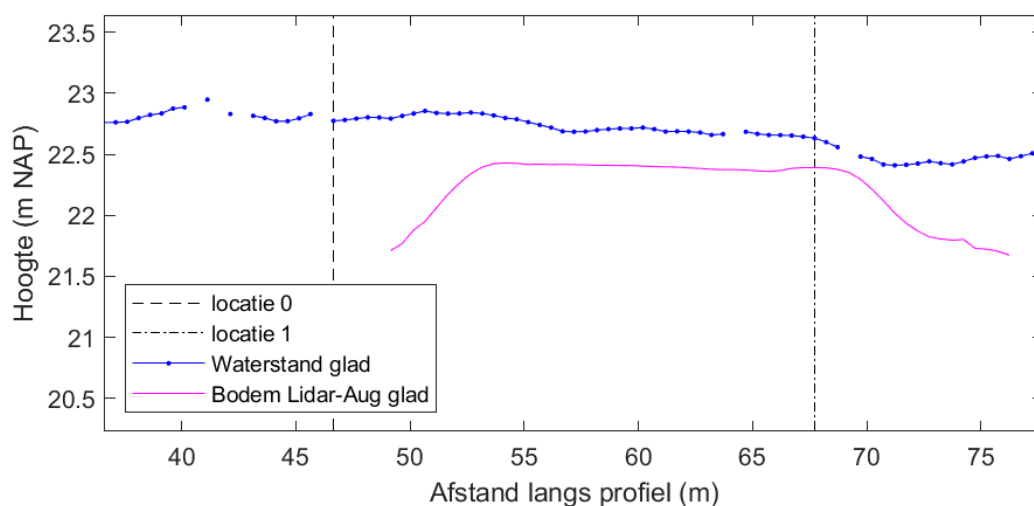
### 3.1.3 Maasbracht kade

Bij Maasbracht was tijdens de LiDAR-opname in juli 2021 een kade overstroomd over een lengte van ongeveer 700 m (Figuur 3-7). Over deze kade loopt een weg (Bunkerhaven). Aan de zijde met de hoofdgeul is de waterstand hoger dan aan de oostzijde van de kade, waardoor water over dit obstakel stroomt.

Figuur 3-8 toont het profiel dwars op deze kade, waarin variatie in de waterstand is waar te nemen boven het obstakel. Het resultaat voor de specifieke afvoer hangt behoorlijk af van waar locatie 1 gekozen wordt. Er is gekozen om deze locatie aan de oostzijde van het obstakel te leggen. Ook voor dit obstakel geldt dat geen reëel resultaat wordt verkregen met vergelijking (1.5) en dus is wederom vergelijking (1.6) toegepast (Tabel 3-3).



Figuur 3-7 Luchtfoto van juli 2021 met waterhoogte uit LiDAR juli 2021(links) en bodemligging voor een profiel op een kade of langsdam van de Maas (rechts). Data is ingewonnen op 17/07/2021 13:00 voor de linkerbaan en op 17/07/2021 12:46 voor de rechterbaan. De linkerbaan is ook deels ingemeten op 17/07/2021 17:32 (bijna 5 uur later).



Figuur 3-8 Waterhoogte en bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 voor het profiel rond het obstakel.

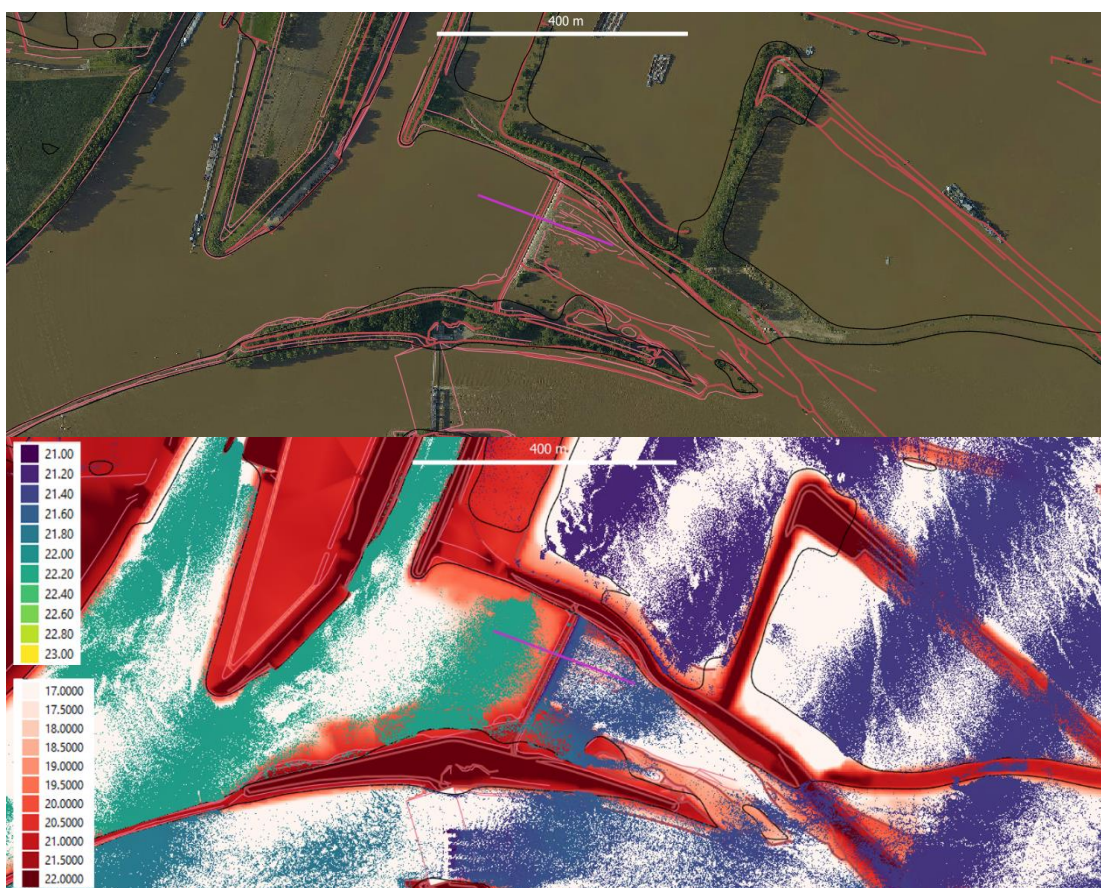
Tabel 3-3 Resultaat voor Maasbracht kade

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	$d_1$ (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer ( $m^2/s$ )
A	(1.6)	21.07	0.24	0.14	0.37

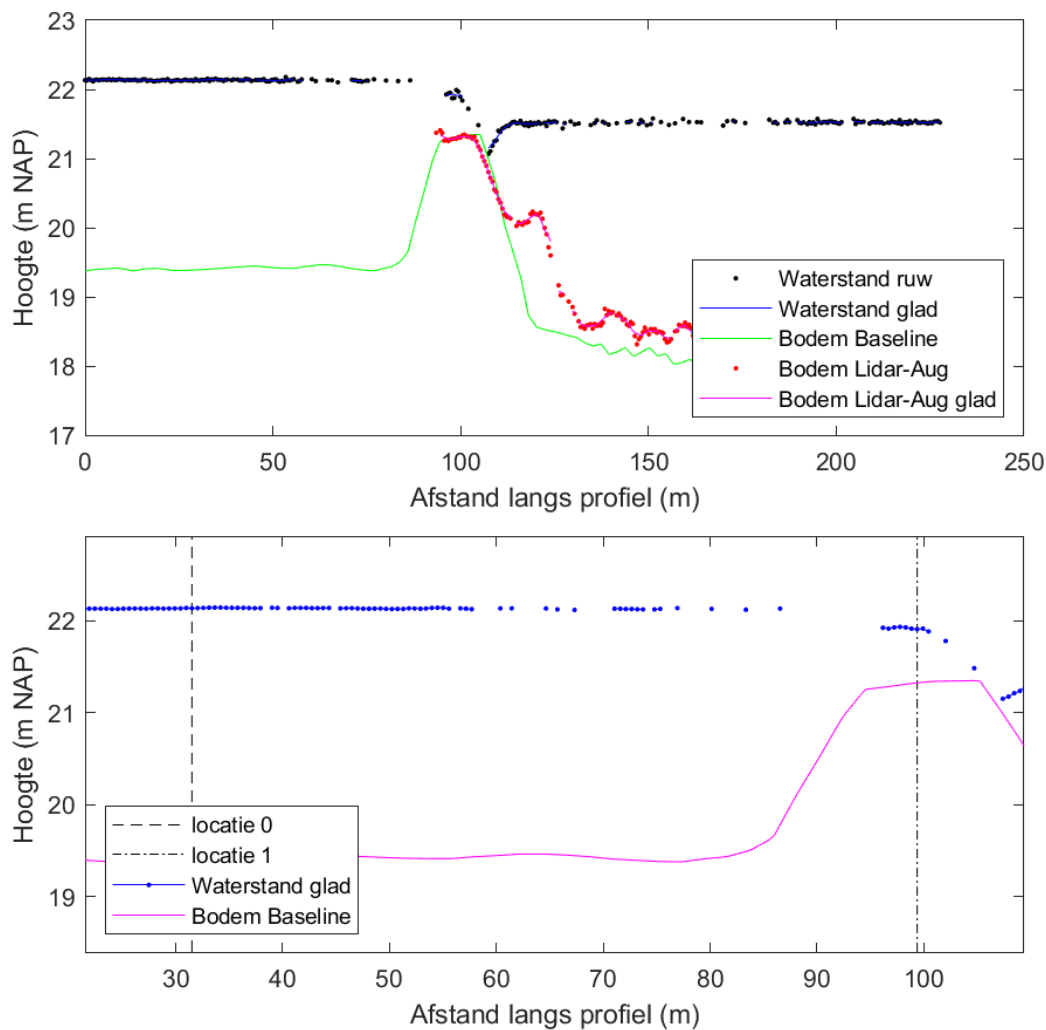
### 3.1.4 Sluisweg bij Heel

Bij Heel en nabij sluizen van het lateraalkanaal stroomde water over de Sluisweg, waarbij wit schuim zichtbaar is op de luchtfoto (Figuur 3-9). Het obstakel met de weg was mooi glad en had ongeveer dezelfde kruinhoogte over de hele breedte van ruim 200 m (Figuur 3-9). Omdat de LiDAR-bodemhoogte geen dekking had bovenstrooms van het obstakel, is in dit geval de Baseline bodemligging gebruikt. Figuur 3-9 boven toont dat het obstakel volgens Baseline wat te ver doorloopt, terwijl de hoogte uit Baseline en de hoogte volgens LiDAR van augustus 2021 vergelijkbaar zijn.

Voor de aangegeven locaties 0 en 1 is succesvol vergelijking (1.5) toegepast voor een volkomen overlaat om de specifieke afvoer te bepalen (Figuur 3-10). Daarbij wordt opgemerkt dat locatie 1 op het midden van het obstakel is geplaatst in plaats van op het einde, omdat de Baseline bodemligging daar vermoedelijk onjuist is (Figuur 3-10 boven). Indicatief is ook berekend wat de specifieke afvoer zou zijn wanneer vergelijkingen (1.6) en ook de vergelijking voor een verdronken overlaat (1.3). De specifieke afvoer volgens vergelijking (1.5) is ongeveer een factor 2.2 hoger dan volgens de andere twee methoden, overeenkomend met het Froude getal volgens voor de volkomen overlaat. De totale afvoer over dit obstakel is dus ongeveer  $612 \text{ m}^3/\text{s}$ , ofwel grofweg 20% van de piekafvoer in de Maas.



Figuur 3-9 Luchtfoto en een profiel dwars op de sluisweg (boven) en waterhoogte uit LiDAR van juli 2021 en bodemligging uit Baseline (onder). Data is ingewonnen op 17/07/2021 16:57 voor de baan voor het obstakel, en 17/07/2021 16:42 voor de baan na het obstakel (15 minuten eerder).



Figuur 3-10 Waterhoogte en bodemligging langs het hele profiel (boven) en voor een gedeelte rond de weg (onder).

Tabel 3-4 Resultaat voor sluisweg bij Heel

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	$d_1$ (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer ( $m^2/s$ )
A	(1.5)	67.85	0.58	0.23	3.06
A	(1.6) indicatief	67.85	0.58	0.23	1.39
A	(1.3) indicatief	67.85	0.58	0.23	1.26

### 3.1.5 Roermond Ooldersplas

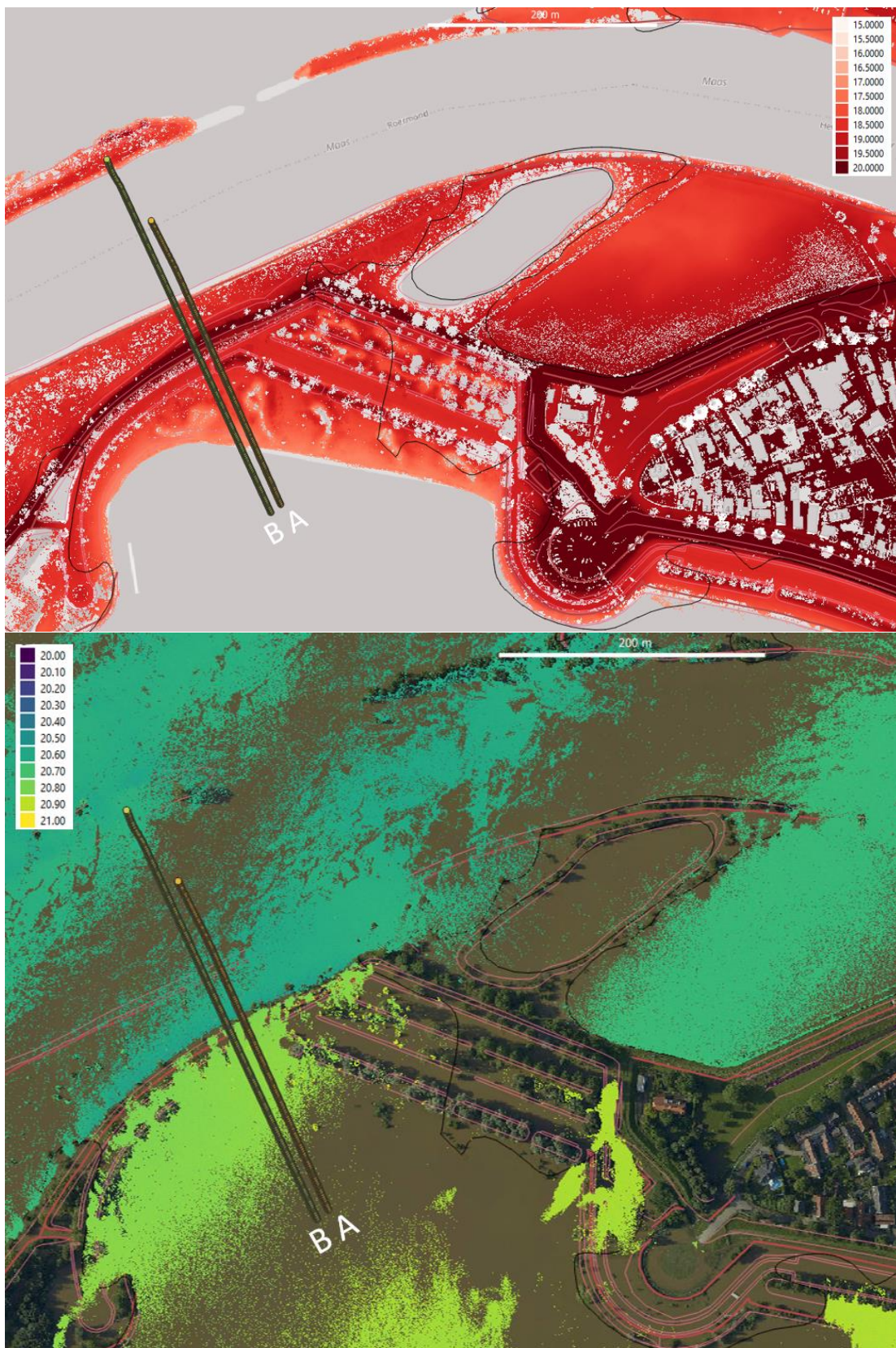
Bij de Ooldersplas is op de luchtfoto zichtbaar dat een watersprong optreedt (Figuur 3-11). De watersprong treedt op vlak na een piek in bodemligging volgens de LiDAR data (Figuur 3-12).

Op basis van de waterstand en bodemligging op locaties 0 en 1 is volgens vergelijking (1.6) specifieke afvoer bepaald voor twee profielen (Tabel 3-5). Voor de beide profielen is precies op de maximale hoogte van de bodem geen waterhoogte beschikbaar, vermoedelijk door aanwezigheid van bomen.

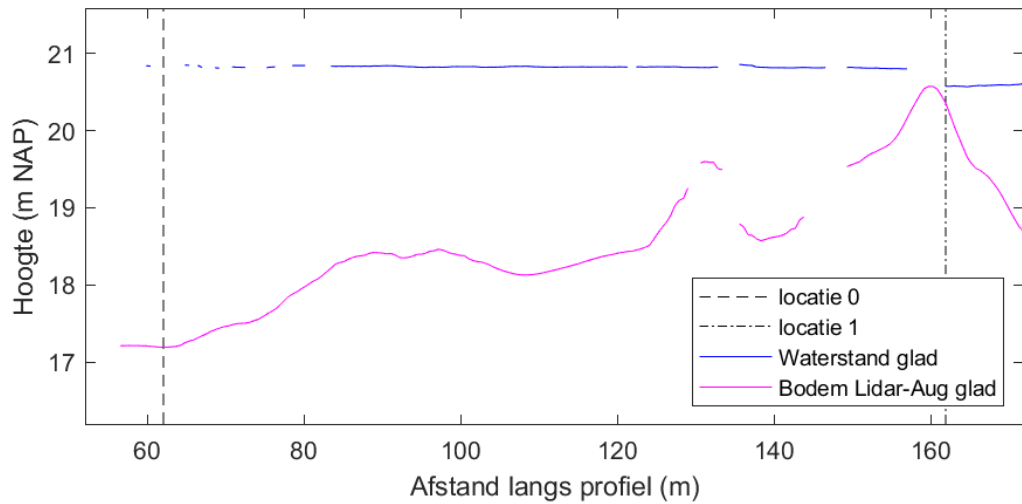
Locatie 1 ligt daardoor niet op de top, maar ongeveer 5 m opgeschoven richting de Maas (Figuur 3-13). De lokale diepte bij locatie 1 is 0,2-0,4 m en is misschien kleiner geweest op de top. Met deze geringe waterdiepte kunnen we verklaren dat een watersprong zichtbaar was. Door het verschil in waterdiepte op locatie 1 tussen beide profielen, verschilt ook de specifieke afvoer aanzienlijk (factor 2,75).



*Figuur 3-11 Detail van luchtfoto bij Roermond Ooldersplas met daarop zichtbaar dat het obstakel als overlaat fungeert. Data is ingewonnen op 17/07/2021 17:01.*



Figuur 3-12 Bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 en twee profielen (boven) en luchtfoto van juli 2021 met waterhoogte uit LiDAR juli 2021 (onder).



Figuur 3-13 Waterhoogte en bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 voor het gedeelte van het profiel A waarover specifieke afvoer is bepaald.

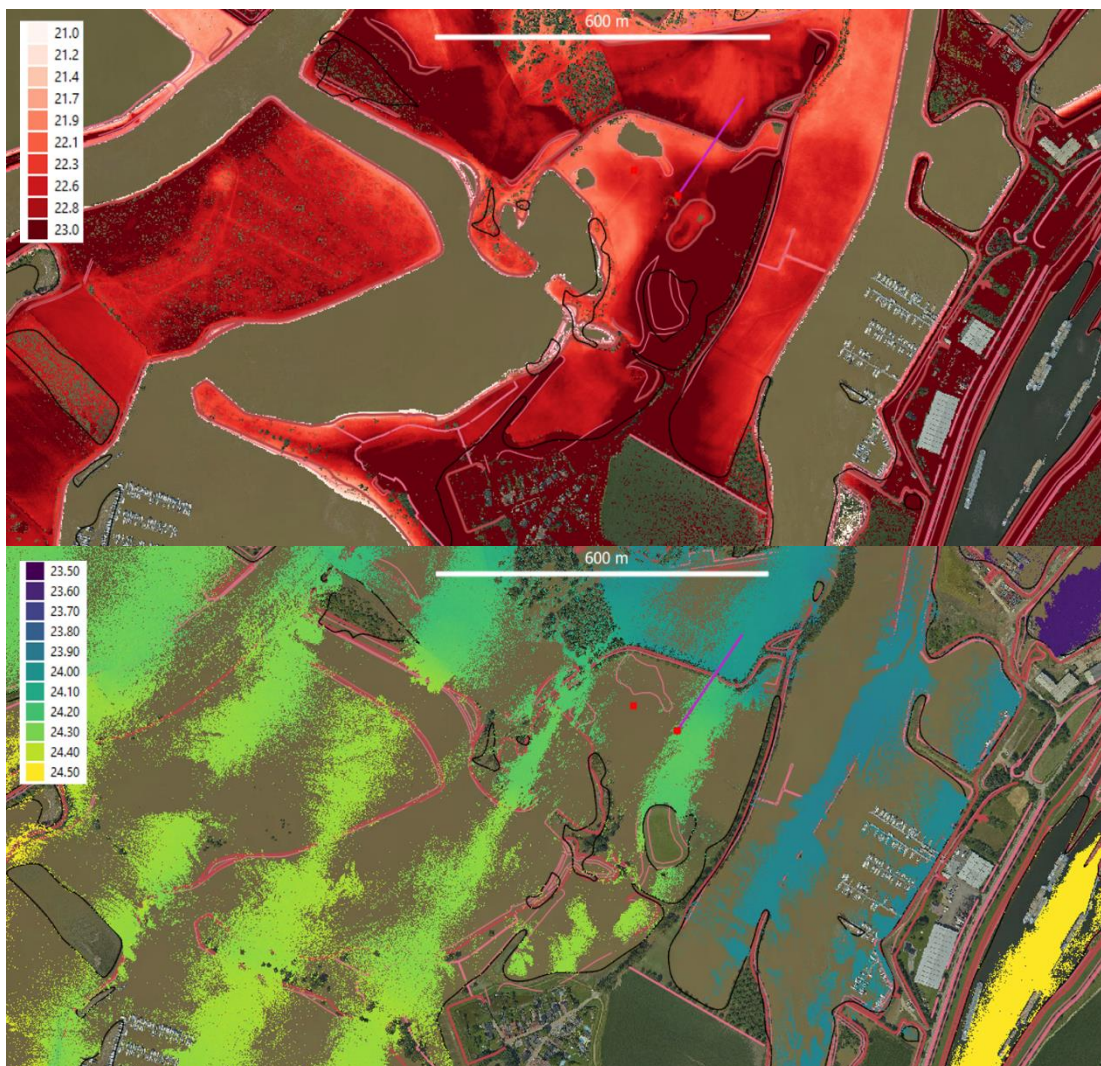
Tabel 3-5 Resultaat voor Roermond Ooldersplas. Data is ingewonnen op 17/07/2021 17:01.

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	d, (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)
A	(1.6)	99.9	0.22	0.26	0.32
B	(1.6)	98.7	0.43	0.26	0.88

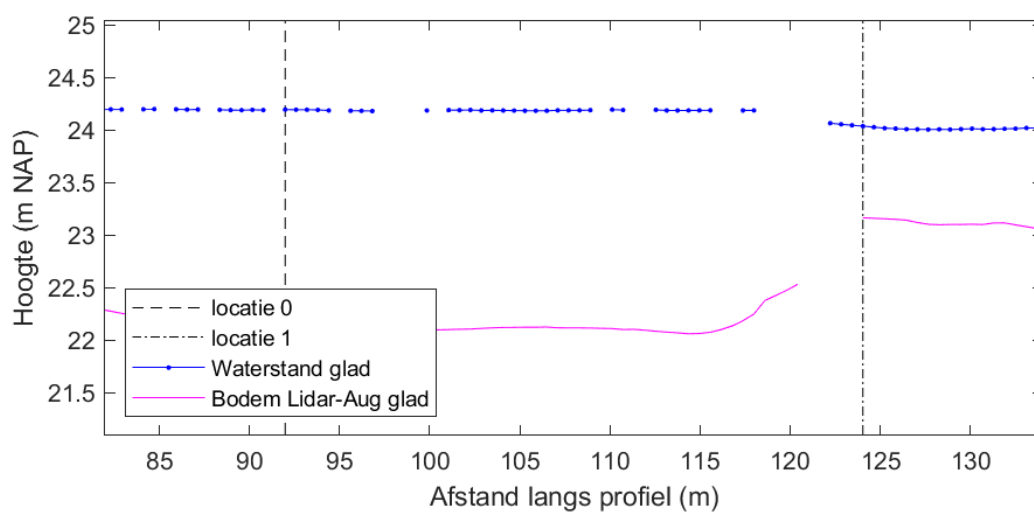
## 3.2 Obstakels als verdronken overlaat

### 3.2.1 Maasbracht

Het meest zuidelijke obstakel dat als verdronken overlaat kan worden gezien ligt bij Maasbracht. In de uiterwaard rechts van de vaargeul ligt een obstakel met bomen erop (Figuur 3-14). Een profiel is getrokken over een opening in de bomenrij (Figuur 3-15), maar mogelijk gaat de aanname van wrijvingsloosheid hier niet goed op. De resulterende specifieke afvoer is 1,7 m<sup>2</sup>/s bij een waterdiepte van 0,87 m op het obstakel (Tabel 3-6).



Figuur 3-14 Luchtfoto, bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 en een profiel in de uiterwaard (boven) en luchtfoto en waterhoogte uit LiDAR van juli 2021 (onder). Data is ingewonnen op 17/07/2021 13:06.



Figuur 3-15 Waterhoogte en bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 voor het gedeelte van het profiel waarover specifieke afvoer is bepaald.

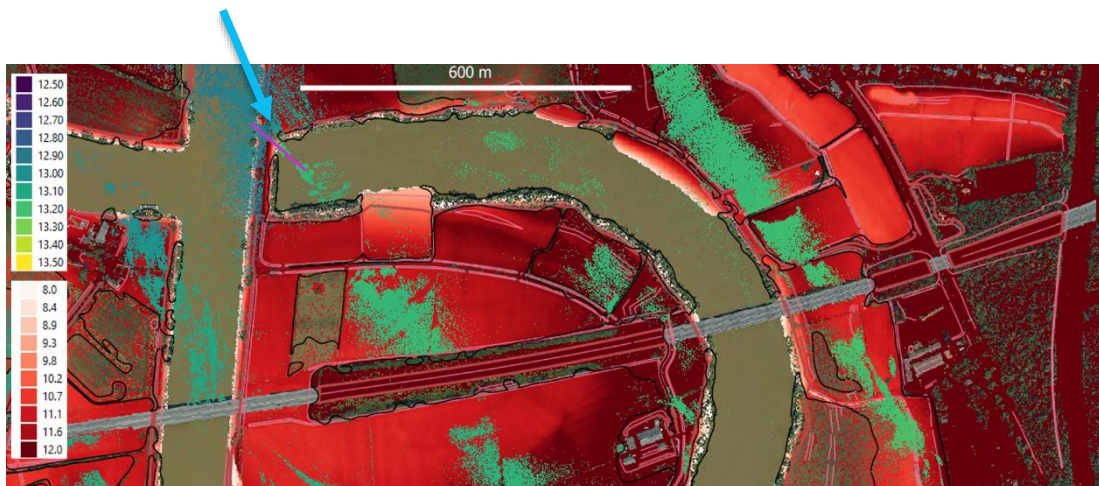


Tabel 3-6 Resultaat voor uiterwaard bij Maasbracht. Data is ingewonnen op 17/07/2021 13:06.

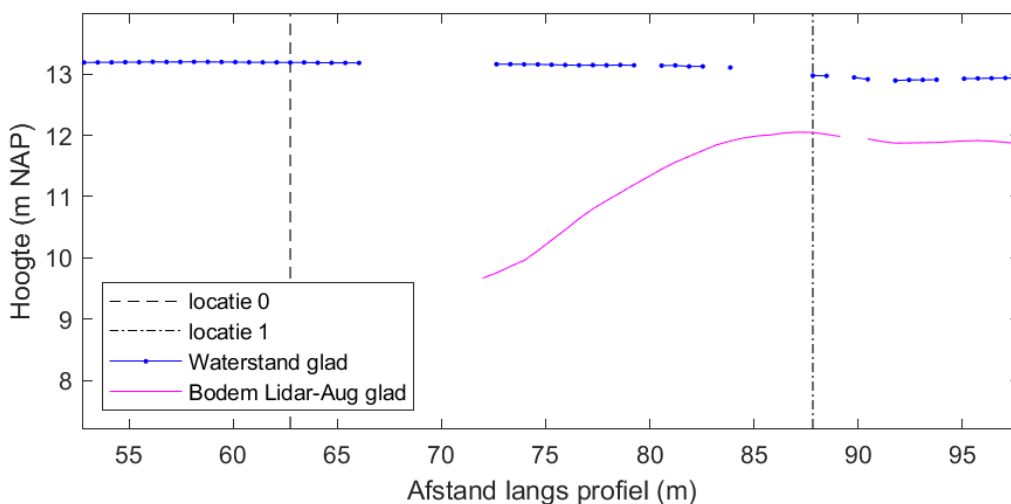
Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	$d_1$ (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer ( $m^2/s$ )
A	(1.3)	32.07	0.87	0.16	1.69

### 3.2.2 Heijen

Bij Heijen stroomde de Oude Maas mee. Een verdronken obstakel lag op de overgang van de Oude Maas naar de Maas (Figuur 3-16). Een profiel is getrokken over de beschikbare LiDAR-waterhoogte gegevens. Over het getrokken profiel was het waterstandsverschil 0,21 m en dit resulteerde in een specifieke afvoer van bijna 2  $m^2/s$  (Tabel 3-7).



Figuur 3-16 Luchtfoto, bodemligging uit LiDAR van augustus 2021, waterhoogte uit LiDAR van juli 2021 en een profiel van een oude Maastak naar de Maas. Data is ingewonnen op 18/07/2021 11:16.



Figuur 3-17 Waterhoogte en bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 voor het gedeelte van het profiel waarover specifieke afvoer is bepaald.

Tabel 3-7 Resultaat voor Heijen. Data is ingewonnen op 18/07/2021 11:16.

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	d <sub>1</sub> (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)
A	(1.3)	25.09	0.93	0.21	1.93

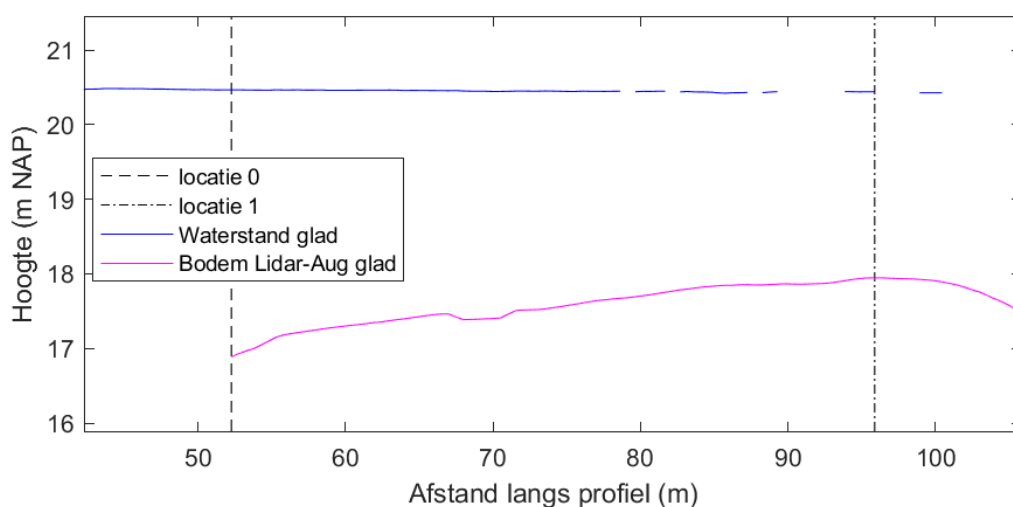
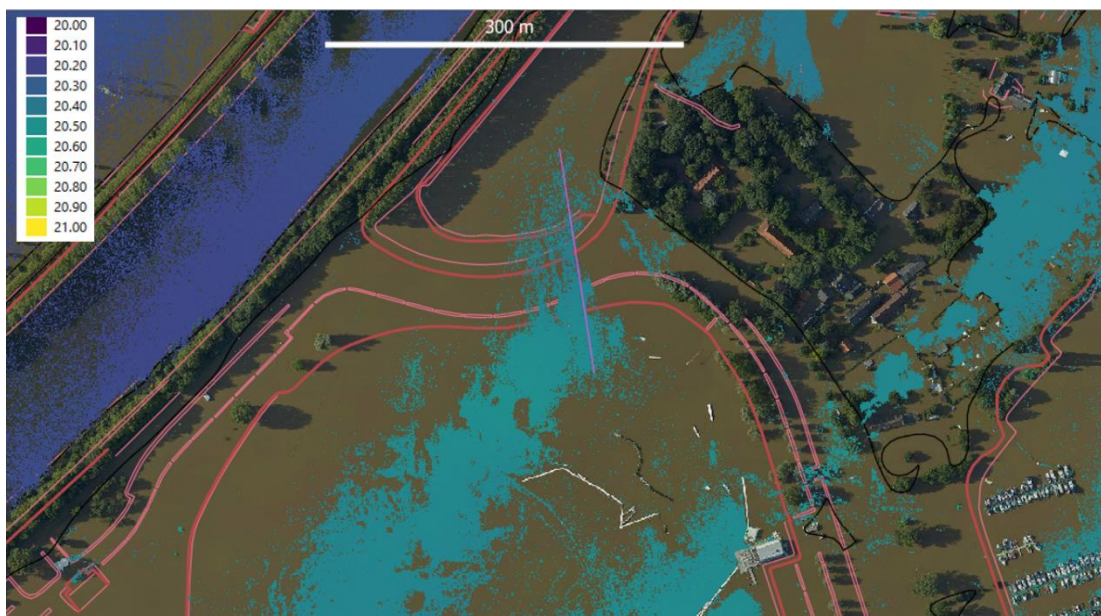
### 3.2.3 Roermond: de Weerd

#### 3.2.3.1 Ligging

Bij Roermond-de Weerd was tijdens het hoogwater in juli 2021 een weg overstroomd (Figuur 3-18). Op deze locatie was, net als bij Heijen, de dekking van de LiDAR-waterhoogte minder dan gebruikelijk (Figuur 3-19). De waterdiepte boven de weg was ruim 2 m.



Figuur 3-18 Luchtfoto juli 2021 bij Roermond de Weerd met in paars het profiel over het obstakel. Data is ingewonnen op 17/07/2021 16:54.



Figuur 3-19 LiDAR-waterhoogte van juli 2021 en de luchtfoto (boven) en waterhoogte en bodemhoogte uit LiDAR van augustus 2021 voor het gedeelte van het profiel waarover specifieke afvoer is bepaald (onder).

### 3.2.3.2 Bepaling en gevoeligheid specifieke afvoer

Op basis van de waterstand en bodemligging op locaties 0 en 1 is volgens vergelijking (1.3) specifieke afvoer bepaald (Tabel 3-8). Het verschil in bodemligging is beperkt doordat in augustus de waterstand niet ver onder de weg stond. Voor deze waterdiepte van ruim 2 m is, net als voor Maastricht Marina, de gevoeligheid ingeschat van een verhoging van de waterstand met -0,2 tot en met 0,2 m (Tabel 3-8). De specifieke afvoer verschilt bij deze toename maximaal 10%, dus is de gevonden specifieke afvoer niet zo gevoelig voor een meetfout in de bodemhoogte of waterhoogte. Daarbij wordt opgemerkt dat het waterstandsverschil slechts 0,026 m is. Wanneer de waterstand alleen bij locatie 1 0,02 m te laag zou zijn in de LiDAR meting, is er nauwelijks meer een verval en dus geen stroming meer.

Tabel 3-8 Resultaat voor een profiel bij Roermond de Weerd

Profiel	Gebruikte vergelijking	Afstand tussen locatie 0 en 1 (m)	$d_1$ (m)	Waterstandsverschil (m)	Specifieke afvoer ( $m^2/s$ )
A	(1.3)	43.63	2.49	0.026	2.49
A (fictief)	(1.3)	43.63	2.29 (-0.2 m)	0.026	2.24 (-10%)
A (fictief)	(1.3)	43.63	2.39 (-0.1 m)	0.026	2.37 (-5%)
A (fictief)	(1.3)	43.63	2.59 (+0.1 m)	0.026	2.62 (+5%)
A (fictief)	(1.3)	43.63	2.69 (+0.2 m)	0.026	2.75 (+10 %)

## 3.3 Discussie

### 3.3.1 Plausibiliteit berekende specifieke afvoer

De overlaatformuleringen zijn toepasbaar voor de genoemde aannamen (hoofdstuk 2). Onder andere is aangenomen dat de stroomlijnen over het obstakel recht zijn en dat het obstakel in de stroomrichting lang genoeg dezelfde hoogte heeft. Op de meeste obstakels in de rivier varieert de bodemhoogte in de stroomrichting echter aanzienlijk. Het profiel dat het meest overeenkomt met de theorie is die van de Schroevendaalseplas (Figuur 3-6). Ook bij de kade van Maasbracht voldoet het bodemprofiel aan de gestelde aannamen, alleen is het gemeten wateroppervlak minder glad en komt niet goed overeen met het theoretisch profiel (Figuur 3-8). Voor de andere toepassingen varieerde de bodemligging aanzienlijk, waardoor de berekende specifieke afvoer afhangt van de keuze van de precieze locaties 0 en 1 op het profiel. Vanwege de aanname van wrijvingsloosheid, zijn de profielen zo gekozen dat bomen zo ver mogelijk lagen van het profiel. Mogelijk was er toch voor sommige obstakels met bomen een effect door de bomen, of was vegetatie aanwezig in juli 2021, waardoor deze aanname niet geldig was.

Voor alle obstakels met vrij verval (volkomen overlaten), inclusief die bij de Schroevendaalseplas en bij de kade van Maasbracht, leverde vergelijking (1.5) geen reëel resultaat op, behalve voor het profiel over de sluisweg van Heel. Voor de andere obstakels met vrij verval moesten we terugvallen op de waarschijnlijk minder betrouwbare vergelijking (1.6) met de aanname dat de stroming op de kruin precies kritisch was. Afhankelijk van de precieze gekozen locatie kan dit tot een aanzienlijke onderschatting van de specifieke afvoer leiden, en daarom worden deze resultaten gezien als niet plausibel. Voor sluisweg Heel werd een Froude getal van 2.2 berekend, wat betekent dat vergelijking (1.6) in dat geval resulteert in een onderschatting van de specifieke afvoer met een factor 2.2. Bovendien heeft een fout in de bepaalde waterhoogte een relatief groot effect op de specifieke afvoer bij een kleine waterdiepte (ongeveer 70% bij een waterdiepte van 0,3 +/- 0,2 m voor Maastricht Pietersplas). De nauwkeurigheid van de berekende specifieke afvoeren kan bepaald worden met een directe vergelijkende meting. Per locatie kan bepaald worden welke nauwkeurigheid wordt vereist: mogelijk is een schatting +/- 70% nog bruikbaar, als er verder geen informatie beschikbaar is.

Tabel 3-9 vat de berekende specifieke afvoeren samen. Als plausibel zijn beoordeeld de toepassingen voor alle verdronken overlaten en voor de Sluisweg bij Heel. De waterdiepte op he obstakel was bij de volkomen overlaat het grootst van alle toepassingen bij volkomen overlaten. Met andere woorden, de bepaling lijkt betrouwbaar bij de obstakels waar de waterdiepte boven de kruin en de specifieke afvoer het grootst was. Dit kan verklaard worden doordat het resultaat op dergelijke locaties minder gevoelig is voor variaties in bodemligging. Bovendien is het effect van een meetfout relatief minder groot voor de getrokken profielen over verdronken obstakels.

De gevoeligheid die is bepaald voor Roermond de Weerd (ongeveer 10% bij +/- 0,2 m) geeft een indicatie van het effect van een meetfout bij een verdrongen overlaat. Mogelijk is het resultaat bij Roermond- de Weerd minder betrouwbaar dan voor andere verdrongen overlaten, omdat het waterstandsverschil relatief klein is. Voor de overige verdrongen overlaten, en de sluisweg bij Heel, is het waterstandsverschil groter dan de maximale fout verondersteld in de LiDAR data (0,15 m). Bovendien was voor deze drie locaties geen aanvullende aanname nodig dat de stroming kritisch was, dus zijn de berekende specifieke afvoeren voor deze locaties waarschijnlijk het meest betrouwbaar.

*Tabel 3-9 Samenvatting toepassing van overlaatformuleringen voor het inschatten van de specifieke afvoer, inclusief beoordeling plausibiliteit*

Locatie	Type overlaat	Waterdiepte op obstakel (d <sub>i</sub> in m)	Waterstandsverschil locatie 0 en 1 (m)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)	Plausibel
<b>Maastricht Pietersplas (profiel B)</b>	volkomen	0.29	0.15	0.48	Nee
<b>Schroevendaalseplas</b>	Volkomen	0.22	0.22	0.33	Nee
<b>Maasbracht kade</b>	Volkomen	0.24	0.14	0.37	Nee
<b>Sluisweg bij Heel</b>	Volkomen	0.58	0.23	3.06	Ja
<b>Roermond Ooldersplas (profiel B)</b>	Volkomen	0.43	0.26	0.88	Nee
<b>Maasbracht</b>	Verdrongen	0.87	0.16	1.69	Ja
<b>Heijen</b>	Verdrongen	0.93	0.21	1.93	Ja
<b>Roermond: de Weerd</b>	Verdrongen	2.49	0.026	2.49	Ja

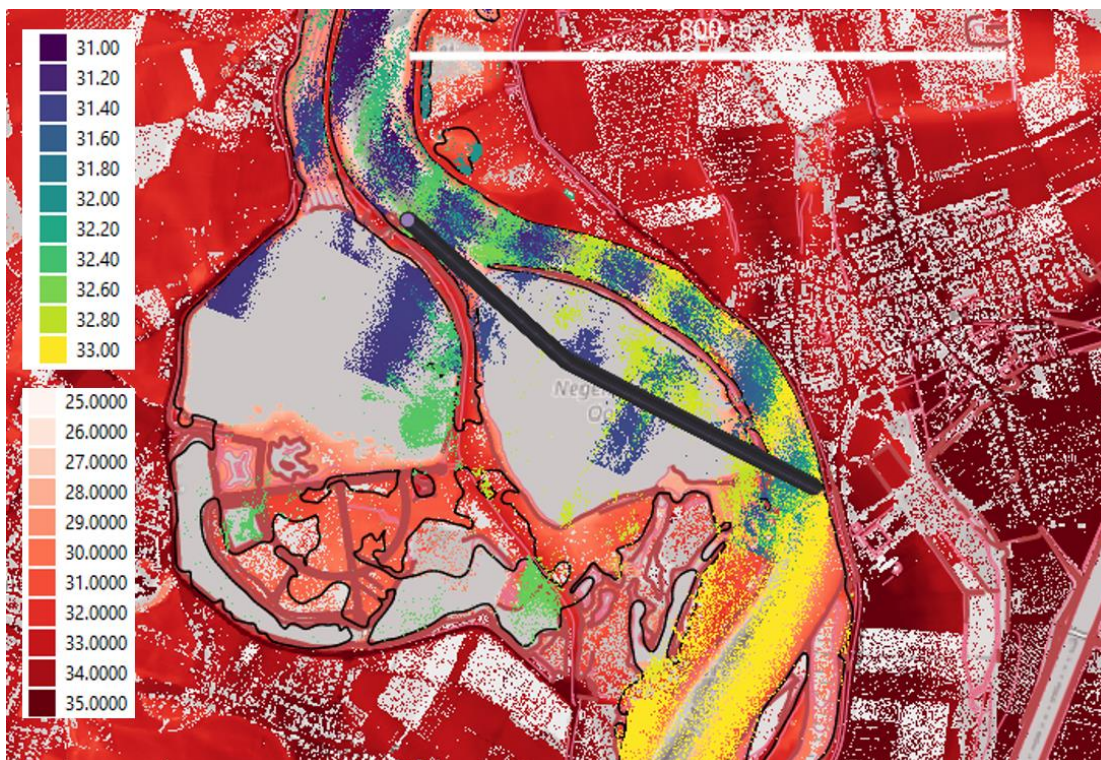
### 3.3.2 Beperkingen van de LiDAR-gegevens

Hoewel de waterhoogte uit LiDAR van juli 2021 uniek is doordat voor de hele Maas tijdens een hoogwater de waterhoogte is bepaald, zijn er ook beperkingen aan de dataset. Naast dat de dekking niet zo volledig is als voor terrein, valt het op dat vaak precies rond het hoogste punt van een obstakel geen waterhoogte is bepaald. Dit kan komen door de aanwezigheid van bomen of een andere oppervlakteruwigheid. Hierdoor moest in sommige gevallen een punt gekozen worden met een lagere bodemligging, waardoor de berekende specifieke afvoer in principe wordt overschat. Daarnaast zijn er enkele gebieden in de rivier aangetroffen waar LiDAR-gegevens van verschillende momenten door elkaar lijken te zijn gemengd (een voorbeeld in Figuur 3-20). Omdat waterhoogte zeker rond een spits hoogwater binnen korte tijd aanzienlijk kan veranderen, is het voor de variabele waterhoogte nauwkeuriger om per gedeelte van de rivier alleen gegevens van een korte periode te gebruiken. Het is technisch mogelijk aparte waterhoogterasters af te leiden, maar dit is niet gedaan.

Ook de LiDAR-terreinhoogte van augustus 2021 is niet volledig dekkend. De precisie van de bodemligging uit LiDAR van augustus 2021 lijkt groter dan de bodemligging uit Baseline op basis van gemaakte vergelijking met de luchtfoto van juli 2021. Een voordeel van de bodemligging uit Baseline is echter de dekking, ook onder het niveau van de waterstand, bij de lage-gemiddelde afvoer in augustus 2021.

Deze beperkingen in bruikbaarheid van de LiDAR-gegevens komen bovenop de eis dat een obstakel een duidelijke en vlakke top moet hebben, waardoor de waterstand waarneembaar afneemt. LiDAR data is geschikt om kleinere inzinkingen dan 0,2 m waar te nemen. Voor nog twee aanvullende locaties zijn profielen bepaald, maar het waterstandsverschil was daar te klein in verhouding met de variatie langs het profiel (in één geval 0,1 m na glad strijken) om specifieke afvoer te kunnen bepalen.

Met andere woorden, tijdens een hoogwater met overstroomde uiterwaarden zijn er zeker locaties vindbaar waar de stroming zich gedraagt als bij een overlaat en waar specifieke afvoer bepaald kan worden, maar een deel van deze locaties valt af doordat de LiDAR-gegevens niet compleet of grillig zijn. Wanneer nieuwe LiDAR-datasets een grotere dekking hebben voor waterhoogte, zal de methode veelvuldig toegepast kunnen worden. Bij obstakels zonder bomen is er potentie om de totale afvoer te bepalen door de specifieke afvoer over meerdere profielen te integreren. Zeker voor obstakels met eenzelfde bodemhoogte, zoals bij wegen vaak het geval is, kan waarschijnlijk de totale afvoer betrouwbaar berekend worden.



*Figuur 3-20 Bodemligging uit LiDAR van augustus 2021, waterhoogte uit LiDAR van verschillende momenten in juli 2021 (zowel 16 als 17 juli) en een profiel (dikke lijn) van de Grensmaas via een uiterwaard in België terug naar de Grensmaas.*

## 4 Overige toepassingen van waterhoogte uit LiDAR

### 4.1 Specifieke afvoer uit verhang

De LiDAR-waterhoogte maakt het mogelijk om verhang te bepalen in de hele riviervallei. Verhanglijnen zijn tijdens het hoogwater op enkele specifieke plaatsen uitgevoerd, onder andere om modellen mee te valideren (Tabel 1-1). Een verhanglijnmeting uitvoeren met een schip over 20-30 km duurt ongeveer 2 uur. In die twee uur kan de waterstand, zeker bij een spitse golftop, substantieel veranderen. Een LiDAR-vlucht heeft als voordeel dat een vluchtlijn over een gedeelte van een rivier kort duurt, orde minuten. Ook wanneer meerdere vluchtlijnen nodig zijn om de rivier dekkend in te meten, kan de opnameperiode aanzienlijk korter zijn dan voor een varende verhanglijnmeting.

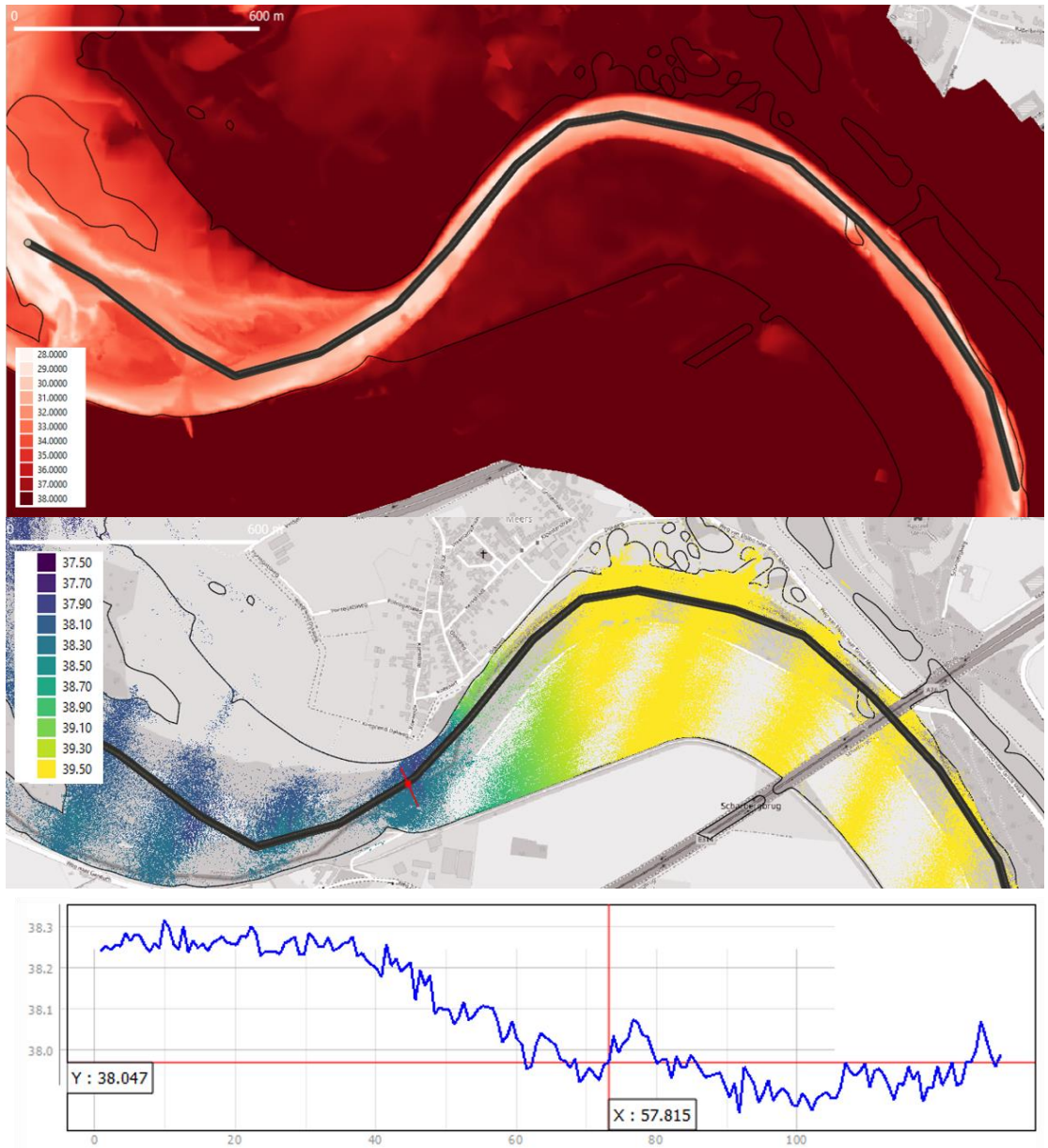
De Lange et al. (2021) hebben uit verhanglijnen ruwheid bepaald. Ook kan je door een ruwheid te veronderstellen, bodemhoogte bepalen (Smart et al., 2009). Als voorbeeld hebben wij voor een scherpe bocht bij Stein in de bovenloop van de Maas over een afstand van ruim 3 km het verhang bepaald voor een langsprofiel dat is getekend in QGIS (Figuur 4-1). Zichtbaar in Figuur 4-2 is dat op 2 km vanaf het begin van het profiel een grote waterstandsgradiënt aanwezig is, waarbij over een kort traject een verval optreedt van 0,8 m. Blijkbaar bevindt zich ter hoogte van 2 km een vernauwing van de dwarsdoorsnede.

Boven- en benedenstrooms van dit traject met 0,8 m verval is met vergelijking (1.7) de stroomsnelheid en specifieke afvoer bepaald. Daarbij is indicatief de waterdiepte geschat voor ieder van de trajecten en gebruikt als hydraulische straal en is een Manning ruwheid van  $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$  gebruikt passend bij een rivier met stenen<sup>2</sup>. Tabel 4-1 geeft de resultaten van deze indicatieve specifieke afvoerberekening. In het bovenstroomse deel waar de hoofdgeul en rivier smal is was het verhang steil met bijna  $-1 \text{ m/km}$ , was de stroomsnelheid  $3 \text{ m/s}$  en de specifieke afvoer bijna  $26 \text{ m}^2/\text{s}$  voor de ingeschatte diepte en Manning ruwheid. Na de bocht waaiert de stroming uit en is de rivier substantieel breder en wat ondieper. Voor het benedenstroomse deel op het profiel is een specifieke afvoer van slechts  $4,6 \text{ m}^2/\text{s}$  bepaald.

Ter illustratie is ook het dwarsverhang bepaald aan het eind van de bocht, waar over het algemeen het dwarsverhang het grootst is (Figuur 4-1 onder). Over het profiel van ruim 100 m is duidelijk een daling waar te nemen van zuid naar noord: in de buitenbocht is de waterstand ongeveer 0,3 m hoger dan in de binnenbocht. Voor getrokken lijnen rond de getoonde lijn, was het dwarsverhang in dezelfde orde grootte en vaak 0,2 m. Dit is groter dan de maximale fout in de LiDAR data, dus kan LiDAR data in elk geval in delen van de rivier met stroomsnelheden van 2-3 m/s en bij scherpe bochten ook gebruikt worden ter verificatie van dwarsverhang berekend met modellen. Bovendien kan voor een verhangmeting de systematische fout waarschijnlijk kleiner verondersteld worden dan 0,05 m, mits de vluchtlijnen bij een vergelijkbare waterstand zijn bepaald. Ook de stochastische fout lijkt voor dit langsverhang kleiner dan 0,1 m (één standaardafwijking). Een deel van de variatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door golven en is daarmee reëel. Onze inschatting is dat de stochastische fout voor dit profiel minder dan 0,05 m is. Er zit minder dan een halfuur tussen alle metingen op deze locatie. Dit langsverhang is dus behoorlijk nauwkeurig.

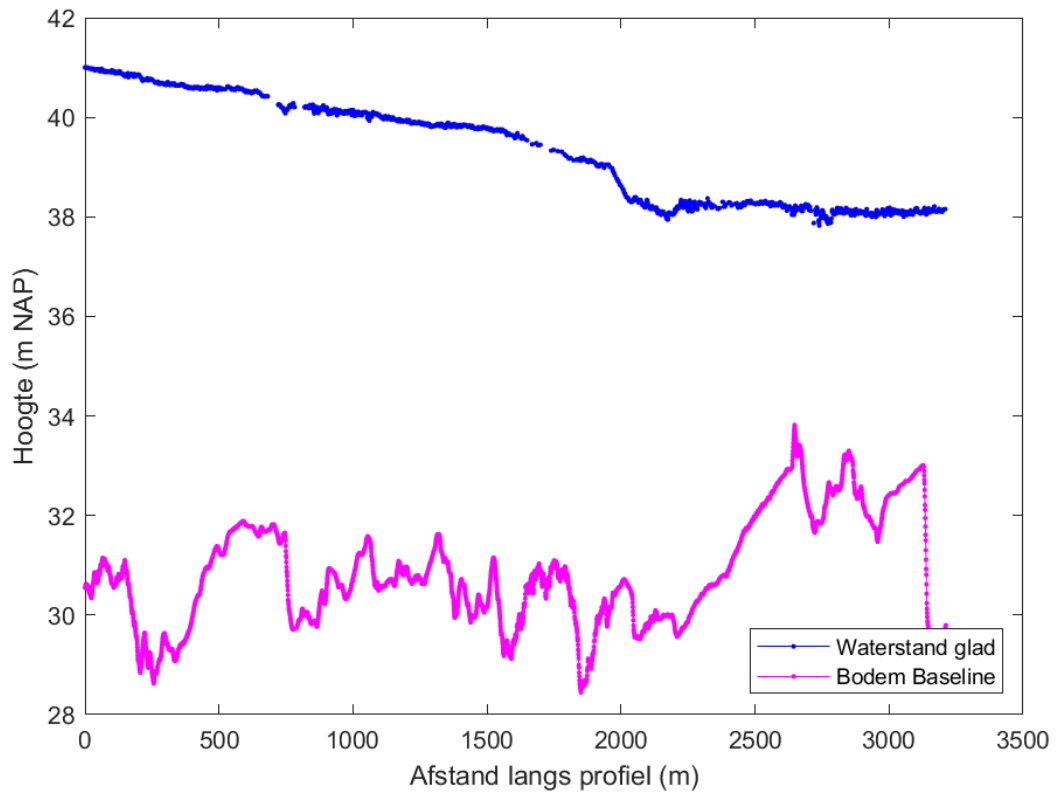
---

<sup>2</sup> [Manning's n Values \(orst.edu\)](https://orst.edu)



Figuur 4-1 Bodemligging uit Baseline en in dik zwart een langsprofiel voor een scherpe bocht bij Stein (boven), de waterhoogte uit LiDAR van juli 2021 en in rood de locatie van een dwarsprofiel (midden) en de waterhoogte op het dwarsprofiel van zuid naar noord in de vernauwing zoals bepaald met de 'Profile Tool' van QGIS (onder). Data is ingewonnen op 16/07/2021 17:33.





Figuur 4-2 Waterstand en bodemligging langs een profiel in een scherpe bocht bij Stein

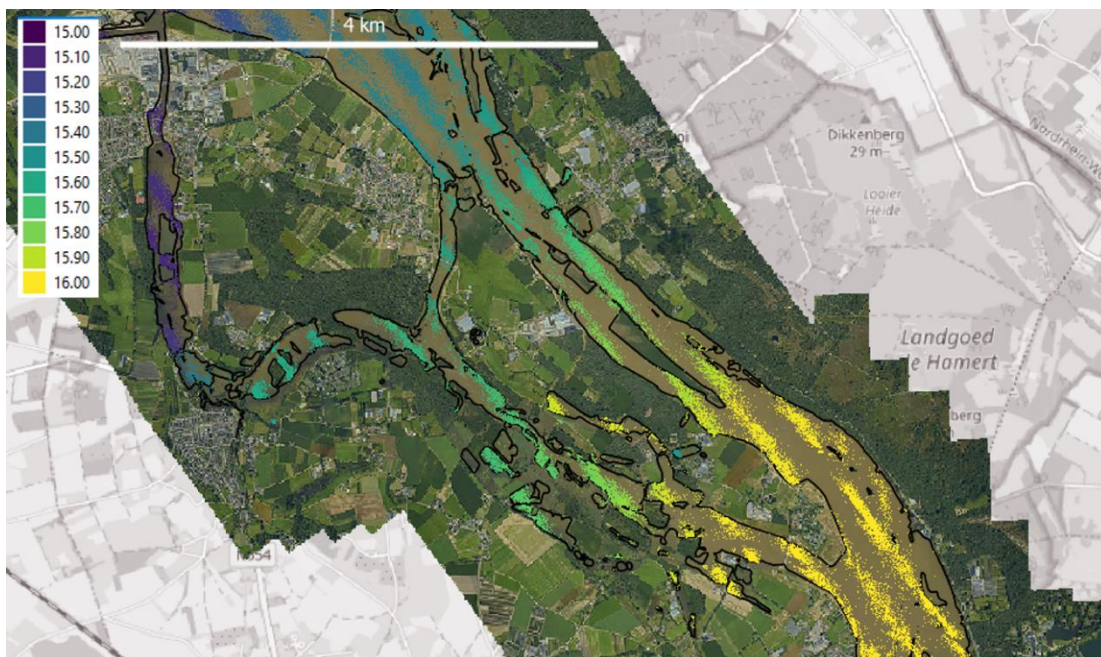
Tabel 4-1 Specifieke afvoer bepaald uit verhang bovenstrooms en benedenstrooms van de dwarsdoorsnede

Traject (deel langs getrokken profiel)	Waterstandsgradiënt (m/km)	Waterdiepte (m)	Stroomsnelheid (m/s)	Specifieke afvoer (m <sup>2</sup> /s)
Bovenstrooms (0-1900 m)	-0.854	8.5	3.04	25.9
Benedenstrooms (2100-3200)	-0.115	5.5	0.84	4.6

## 4.2 Verbinding van overstromde gebieden en inundatiekaart

Bij de verwerking van een opname tijdens een LiDAR-vlucht wordt de overgang bepaald tussen terrein en water. Meestal bleek deze lijn juist, alleen in sommige gevallen is water geclassificeerd als terrein, of andersom (Figuur 1-2). De lijn kan gebruikt worden om te bepalen of delen van de riviervallei in open verbinding stonden met de rivier op het moment van de vlucht. Figuur 4-3 toont een voorbeeld voor een deel van de riviervallei waar de water-terrein lijn nuttige informatie kan leveren. Een toepassing van deze informatie zou het verifiëren van modellen kunnen zijn.

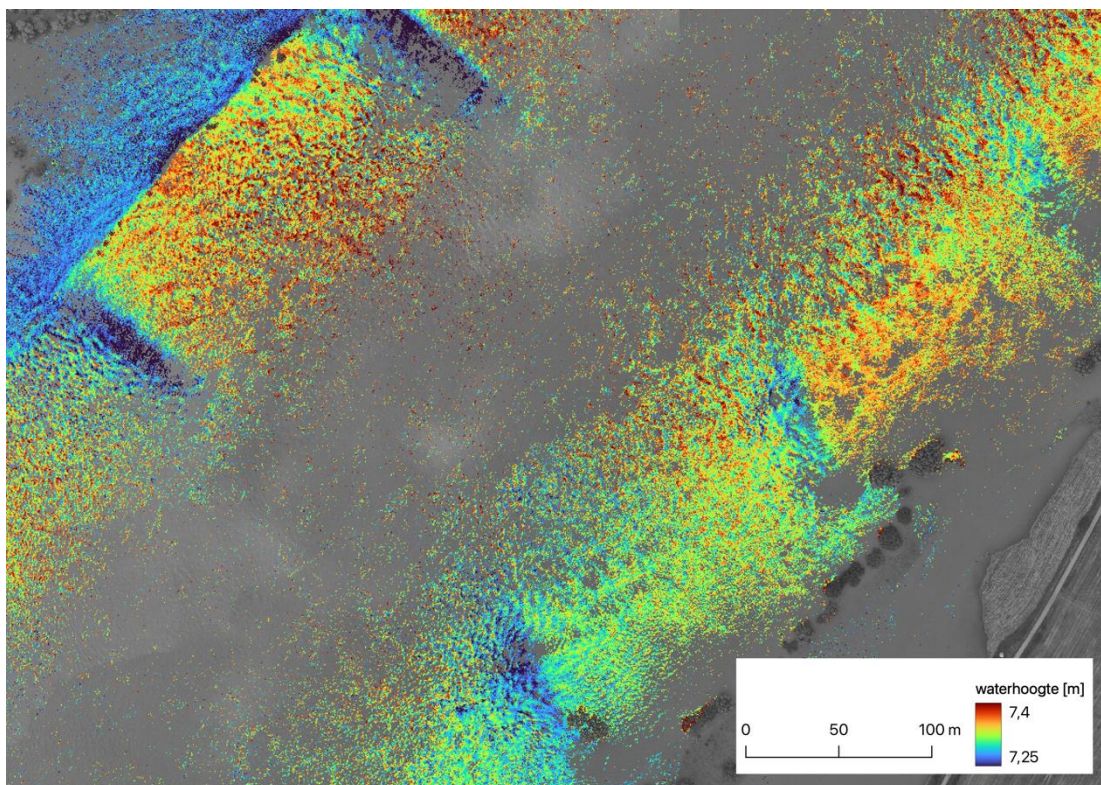
Een tweede toepassing van de land-terrein lijn is het maken van een inundatiekaart. Na een hoogwater wordt een inundatiekaart gemaakt om (aangegeven) schade te verifiëren. Wanneer de LiDAR-vlucht precies tijdens de hoogste waterstand wordt gevlogen, geeft de water-terrein lijn direct de inundatiekaart (mits goed geclassificeerd). Wanneer de vlucht net op een ander moment tijdens het hoogwater wordt gevlogen, is de water-terrein lijn een goed startpunt van de inundatiekaart.



Figuur 4-3 Luchtfoto en LiDAR-waterhoogte van juli 2021 bij Blitterswijck.

### 4.3 Inzinking kribkop

Watersversnelling en dus ook een verlaging van het wateroppervlak treedt ook op bij kribben. Deze versnelling vindt ook plaats bij niet-extreme omstandigheden, maar tijdens een hoogwater zullen kribben vaak volledig zijn overstroomd. Ter illustratie, toont Figuur 4-4 inzinkingen boven een vijftal kribben in de Waal. Hoewel de inzinking ongeveer hetzelfde is als de maximale fout, zijn de patronen overtuigend toe te schrijven aan de versnelling van de stroming boven de kribben. Hiermee kan de kennis over energieverlies bij kribben verfijnd worden, en kunnen uiteindelijk modellen verbeterd worden.



Figuur 4-4 Waterstand gemeten uit LiDAR in de Waal bij Ophemert, waarbij de inzinking boven vijf kribben en ook een overlaatstroming over een kade naar een nevengeul (met lagere waterstand; linksboven) zichtbaar is.

Mogelijk zijn in LiDAR-waterhoogte kaarten ook de grootschalige wervels zichtbaar door een verlaging van de waterstand. We zijn hier echter nog geen voorbeelden van tegen gekomen.

We verwachten dat, net zoals voor kribben en overlagen, ook patronen zichtbaar zijn in de LiDAR waterhoogte die worden veroorzaakt door bodemhoogtevariëaties onder water, zoals door rivierduinen of harde lagen. Schroevers (2017) suggereert dat de waterhoogte varieert met de afstand tussen bodemschermen in de Waal. Een dergelijke variatie zijn we voor het hoogwater in de Maas niet tegen gekomen.

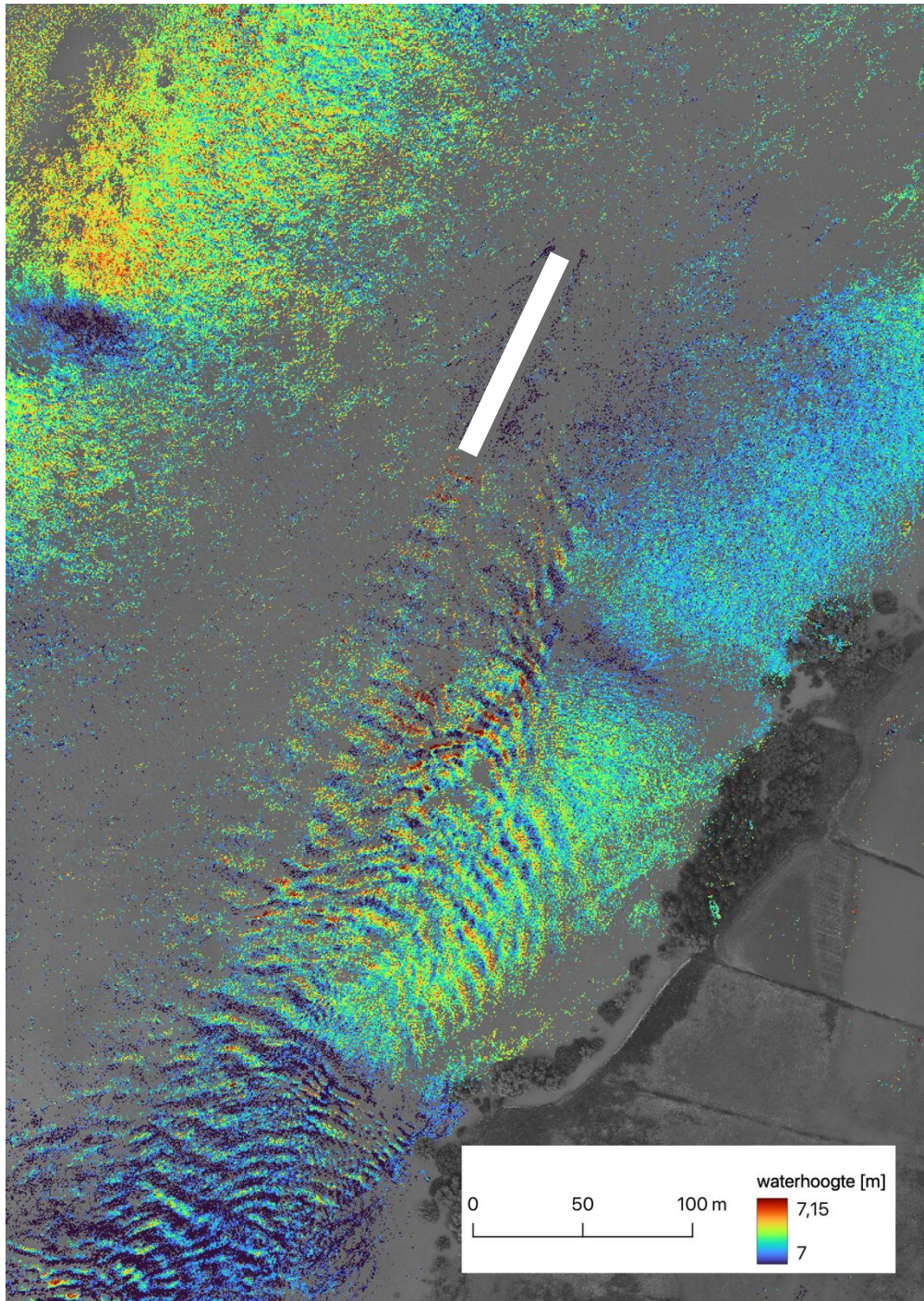
#### 4.4 Scheepsgolven en windgolven

In de LiDAR opnames zijn schepen goed te detecteren, niet alleen door de waarneming van het schip zelf, maar ook door de metingen van de waterhoogte. De drukgolf, en boeg- en hekgolven zijn duidelijk zichtbaar. Mogelijk kan uit de hoek van de golven de relatieve snelheid van het schip ten opzichte van het water worden afgeleid. Samen met de scheepssnelheid kan zo hypothetisch stroomsnelheid worden bepaald. Een voorbeeld van een detectie van scheepsgolven en reflecties van golven is gegeven in Figuur 4-5.

Oevererosie wordt in Nederlandse rivieren voor een groot deel veroorzaakt door scheepsgolven. Met behulp van de tool D-FAST BE (Bank Erosion)<sup>3</sup>, kan een inschatting worden gemaakt van oevererosie. Binnen deze tool worden echter aannamen gedaan over de afname van de scheepsgolfhoogte naar de oever. LiDAR data biedt de mogelijkheid om deze aannamen te verifiëren.

<sup>3</sup> <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/d-fast/>

Gezien de zichtbare golfpatronen in de waterhoogtes, verwachten we dat ook windgolven met een hoogte vanaf 0,05 m zichtbaar moeten zijn. Deze data kan gebruikt worden ter validatie van numerieke modellen, zoals SWAN. Validatie data voor smallere wateren (zoals de rivieren) is tot nu toe niet beschikbaar. Tijdens het hoogwater op de Maas van juli 2021 was de wind over het algemeen zwak, dus hebben we niet geprobeerd om hier een voorbeeld van te vinden.



*Figuur 4-5 Golfpatronen veroorzaakt door het passeren van een binnenvaartschip op de Waal bij Heerewaarden zijn zichtbaar in deze LiDAR waterhoogtes van juli 2021. Het silhouet van een schip is aangegeven met een witte polygoon.*

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

De conclusies uit deze verkenning zijn:

- 1 Op basis van met LiDAR ingewonnen waterhoogte tijdens een hoogwater en terreinhoogte tijdens normale waterstand kan specifieke afvoer worden berekend bij specifieke overstromde obstakels op basis van overlaatmethoden.
  - a) Voor obstakels met een vrij verval onderschat de methode voor 4 van de 5 obstakels substantieel, mogelijk met een factor 2. Voor het obstakel met een waterdiepte op het obstakel groter dan 0,5 m is de specifieke afvoer als plausibel beoordeeld, en was de totale afvoer grofweg 20% van de piekafvoer van de Maas.
  - b) Voor verdronken obstakels is voor alle 3 locaties de specifieke afvoer als plausibel beoordeeld.
  - c) Vooral bij obstakels met een uniforme kruinhoogte en een waterdiepte groter dan 0,5 m, waarvoor de gevoeligheid van specifieke afvoer voor waterdiepte minder groot is, is er potentie om de totale afvoer te bepalen op basis van de overlaatmethoden.
- 2 De LiDAR gegevens kunnen ook gebruikt worden voor andere toepassingen, waaronder:
  - a) Verificatie van waterhoogte in hydrodynamische modellen door langs- en dwarsverhang in de hoofdgeul te bepalen uit LiDAR-data en door verificatie van de ondergelopen delen in uiterwaarden.
  - b) Het maken van een inundatiekaart van een hoogwater.
  - c) Het energieverlies bij overstromde kribben beter gaan begrijpen.
  - d) Waarneming van scheepsgolven en hun afname naar de oever, waarmee aannames in de oevererosietool D-FAST BE geverifieerd kunnen worden.
  - e) Waarneming van windgolven, waarmee golfmodellen geverifieerd kunnen worden.

### 5.2 Aanbevelingen

Voor de inwinning van LiDAR gegevens bevelen wij aan:

- 1 Bij iedere LiDAR-vlucht naast terreinhoogte ook waterhoogte te bepalen.
  - a) Zowel bij een hoogwater als een standaard (winter)opname zijn voor de vlakdekkende waterhoogte meerdere toepassingen denkbaar.
  - b) Voor de LiDAR vluchten van juli 2021 zijn kort voor het hoogwater de default specificaties bepaald. Door de specificaties vast te leggen en de LiDAR vluchten op te nemen in het hoogwatermeetplan en het Quick Reaction Force plan (van Nieuwkoop, 2021) wordt een beter product verkregen.
  - c) Naast de kaarten met een resolutie van 0,5 m, ook vluchtlijnen met tijden beschikbaar te stellen, zodat zonder het laden van de ruwe data nagegaan kan worden wanneer een hoogte is bepaald.
- 2 Maak op basis van de geselecteerde toepassingen een meetplan.
  - a) Om tot een beter vlakdekkende kaart van waterhoogtes te komen, is het nodig het vluchtplan aan te passen. Hierbij kan worden gedacht aan vlieglijnen dicht bij elkaar vliegen, of hoger vliegen, waarbij aan de specificaties (kwaliteitseisen voor verschillende toepassingen) wordt voldaan.
  - a) Gelet op de dynamiek van het wateroppervlak wordt idealiter in één overvlucht zoveel mogelijk ingemeten van een riviersectie, zodat er weinig overlap nodig is. Dit is vooral van belang bij hydraulische knelpunten (zoals bij Stein).

- b) In deze casus is er ingevlogen met LiDAR systemen met een kijkhoek tot 40 graden, waarbij de waterreflecties slechts optreden tot 10 graden. Deze hoek van 10 graden is specifiek voor de staat van het wateroppervlak tijdens het hoogwater. Nader onderzoek is vereist om verder te generaliseren van welke hoek uitgegaan kan worden in toekomstige vluchten.

Voor de toepassing van LiDAR waterhoogte en bodemligging om specifieke afvoer te bepalen bevelen wij aan:

- 1 Systematischer specifieke afvoer te bepalen in lijnen dwars op obstakels waar het waterstandsverschil meer dan 0,2 m betreft.
  - a) Door de handmatige gevolgde stappen te automatiseren kan iedere 0,5 m een specifieke afvoer worden bepaald voor een obstakel. Vervolgens kan op lijnen met onvoldoende dekking van waterhoogte of bodemligging de specifieke afvoer bepaald worden uit interpolatie, en kan de totale afvoer over het obstakel bepaald worden.
  - b) Ook kan door automatisering van de uitgevoerde stappen de consistentie van de uitkomsten worden geverifieerd.
  - c) Verder is het wenselijk om de specifieke afvoeren te valideren met directe metingen of op een andere manier de nauwkeurigheid/gevoeligheid (automatisch) in beeld te brengen.
  - d) Daarnaast kunnen methodes worden ontwikkeld om automatisch naar geschikte overlaten te zoeken bij de waterstand tijdens de vlucht, waardoor meer (100?) obstakels geschikte obstakels gevonden kunnen worden om de overlaatmethoden op toe te passen.
- 2 Validatie van de toegepaste methoden om de nauwkeurigheid vast te stellen met:
  - a) Stroomsnelheidsmetingen direct bij een obstakel die als overlaat gezien kan worden.
  - b) Een vergelijking van gevonden specifieke afvoer met modelresultaten is nuttig, al is deze indirect. Bij een dergelijke vergelijking kunnen ook meteen verhang en de open verbindingen van waterlichamen gevalideerd worden op het moment van LiDAR-opname tijdens het hoogwater.

## 6 Literatuurlijst

- Ali, Shahid (2013) Flow over weir-like obstacles, PhD thesis, TU Delft, 2013.
- Chaudhry, M. H. (2008) Open Channel flow. 2nd edition, Springer, New York, USA.
- Chow, V. T. (1959) Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, US.
- De Lange, S. I., S. Naqshband and A. J. F. Hoitink (2021) Quantifying Hydraulic Roughness From Field Data: Can Dune Morphology Tell the Whole Story? Water Resources Research Volume 57, Issue12, <https://doi.org/10.1029/2021WR030329>
- ENW (2021), Hoogwater 2021 Feiten en Duiding, Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- Gensen, M.R.A. (2021) Discharge and water level uncertainty in bifurcating rivers, PhD thesis University of Twente, Enschede.
- Hopkinson, C., N. Crasto, P. Marsh, D. Forbes, and L. Lesack (2011) "Investigating the Spatial Distribution of Water Levels in the Mackenzie Delta Using Airborne LiDAR." Hydrological Processes 25 (19): 2995–3011. <https://doi.org/10.1002/hyp.8167>.
- Niesten, Iris, Anna Kusters en Aukje Spruyt (2022) Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model: Modelbouw, kalibratie en validatie, Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0012.
- Rura-AHA (2022) Analyse Hoogwater Maas juli 2021 (metingen – verwachtingen), i.o.v. Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, Referentie: 4500322103, Datum: 16-03-2022.
- Scherer, Daniel, Christian Schwatke, Denise Dettmering, and Florian Seitz (2022) "ICESat-2 Based River Surface Slope and Its Impact on Water Level Time Series From Satellite Altimetry." Water Resources Research 58 (11): e2022WR032842. <https://doi.org/10.1029/2022WR032842>.
- Schroevers, Rinus (2017) Afvoeren in uiterwaarden bepalen met remote sensing technieken, Deltares kenmerk 1230041-003, 2 januari 2017
- Smart, G.M., J. Bind and M.J. Duncan (2009) River bathymetry from conventional LiDAR using water surface returns, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009, <http://mssanz.org.au/modsim09>
- Van der Deijl, Eveline (2022) Validatie hoogwater Maas juli 2021, Concept rapport 11208053-002-ZWS-0006.
- Van Nieuwkoop, Joana (2021) QRF protocol monitoren op rivieren tijdens hoogwater. Deltares memo 11205235-006-ZWS-0003, 1 oktober 2021, werkdocument.
- Vernimmen, R.; Hooijer, A.; Mulyadi, D.; Setiawan, I.; Pronk, M.; Yuherdha, A.T. (2020) A New Method for Rapid Measurement of Canal Water Table Depth Using Airborne LiDAR, with Application to Drained Peatlands in Indonesia. Water 12, 1486, <https://doi.org/10.3390/w12051486>.

# A Bijlage: begin en eindtijd van opnametijd LiDAR-punten per kaartblad (C\_MAASHW2021\_)

Kaartblad	Aantal punten	Sample	Min tijd	Max tijd
39DZ1.LAZ	78224684	7823	2021-07-19T13:06:17.264	2021-07-19T14:12:20.950
39DZ2.LAZ	275352344	27536	2021-07-19T10:00:19.090	2021-07-19T14:09:56.967
39GZ1.LAZ	238628831	23863	2021-07-19T09:58:51.936	2021-07-19T10:57:36.690
39GZ2.LAZ	245040053	24505	2021-07-19T09:07:03.520	2021-07-19T11:07:39.422
39HZ1.LAZ	207905273	20791	2021-07-19T09:06:45.765	2021-07-19T11:07:35.503
39HZ2.LAZ	108750	11	2021-07-19T09:47:44.883	2021-07-19T09:47:47.581
44BZ2.LAZ	4771314	478	2021-07-19T18:22:36.959	2021-07-19T18:57:33.985
44EN2.LAZ	14	1	2021-07-19T15:50:10.779	2021-07-19T15:50:10.779
44EZ1.LAZ	186709740	18671	2021-07-19T18:21:07.993	2021-07-19T18:57:33.825
44EZ2.LAZ	189088145	18909	2021-07-19T18:19:38.793	2021-07-19T18:56:07.973
44FN1.LAZ	265889258	26589	2021-07-19T15:09:00.151	2021-07-19T15:51:24.963
44FN2.LAZ	203038978	20304	2021-07-19T15:06:52.778	2021-07-19T17:43:23.992
44FZ1.LAZ	278200228	27821	2021-07-19T17:40:51.776	2021-07-19T18:54:39.230
44FZ2.LAZ	310633811	31064	2021-07-19T15:06:52.258	2021-07-19T18:15:55.316
44HN1.LAZ	20957	3	2021-07-19T18:18:16.482	2021-07-19T18:18:18.087
45AN1.LAZ	40526578	4053	2021-07-19T15:06:52.719	2021-07-19T17:54:45.719
45AN2.LAZ	63052143	6306	2021-07-19T13:07:15.584	2021-07-19T14:58:04.355
45AZ1.LAZ	243231574	24324	2021-07-19T14:19:51.332	2021-07-19T18:14:24.001
45AZ2.LAZ	232822581	23283	2021-07-19T14:18:17.458	2021-07-19T14:58:46.201
45BN1.LAZ	425632176	42564	2021-07-19T13:06:25.093	2021-07-19T14:57:13.200
45BN2.LAZ	228341538	22835	2021-07-19T10:26:44.380	2021-07-19T14:34:20.313
45BZ1.LAZ	141413901	14142	2021-07-19T14:05:36.503	2021-07-19T14:57:13.605
45BZ2.LAZ	2278619	228	2021-07-19T14:16:36.779	2021-07-19T14:34:21.673
45EN1.LAZ	162606080	16261	2021-07-19T10:35:20.274	2021-07-19T11:15:44.966
45EN2.LAZ	115359446	11536	2021-07-19T09:07:01.856	2021-07-19T11:17:17.601
45FN1.LAZ	246712873	24672	2021-07-19T08:47:07.484	2021-07-19T11:17:41.966
45FN2.LAZ	330529234	33053	2021-07-19T08:46:47.733	2021-07-19T09:49:52.054
45FZ1.LAZ	116953	12	2021-07-19T08:47:04.944	2021-07-19T08:47:08.969
45FZ2.LAZ	42725820	4273	2021-07-19T08:46:34.812	2021-07-19T09:24:35.619
46AN1.LAZ	125430485	12544	2021-07-18T15:14:44.487	2021-07-19T09:50:58.773
46AN2.LAZ	173088481	17309	2021-07-18T10:15:28.577	2021-07-18T15:23:43.084
46AZ1.LAZ	174547307	17455	2021-07-18T15:17:33.169	2021-07-19T09:51:17.993
46AZ2.LAZ	289502917	28951	2021-07-18T10:15:03.468	2021-07-18T15:39:45.013
46BN1.LAZ	534592	54	2021-07-18T10:15:25.863	2021-07-18T14:51:28.318
46BZ1.LAZ	478903786	47891	2021-07-18T10:12:53.537	2021-07-18T14:53:44.513
46BZ2.LAZ	137820223	13783	2021-07-18T14:06:58.945	2021-07-18T14:53:46.224
46DN1.LAZ	257559058	25756	2021-07-18T10:12:16.580	2021-07-18T14:54:03.885
46DN2.LAZ	493797812	49380	2021-07-18T10:10:22.258	2021-07-18T14:54:59.993
46DZ1.LAZ	32928877	3293	2021-07-18T13:15:58.763	2021-07-18T14:02:46.363



46DZ2.LAZ	324315077	32432	2021-07-18T10:09:26.110	2021-07-18T14:02:11.885
46GN1.LAZ	146696	15	2021-07-18T14:08:33.364	2021-07-18T14:10:29.595
46GZ1.LAZ	154550170	15456	2021-07-18T10:07:51.548	2021-07-18T13:13:33.082
52BN2.LAZ	94176295	9418	2021-07-18T13:03:12.011	2021-07-18T15:06:50.987
52EN1.LAZ	457063080	45707	2021-07-18T10:06:34.428	2021-07-18T15:06:12.119
52EN2.LAZ	101994643	10200	2021-07-18T10:05:16.676	2021-07-18T13:05:37.970
52EZ1.LAZ	139454707	13946	2021-07-18T11:33:48.061	2021-07-18T15:05:08.173
52EZ2.LAZ	409966623	40997	2021-07-18T08:59:27.845	2021-07-18T13:56:41.091
52FZ1.LAZ	96430617	9644	2021-07-18T08:57:13.648	2021-07-18T10:43:09.504
52GN2.LAZ	272183487	27219	2021-07-18T09:03:07.673	2021-07-18T09:56:32.264
52GZ2.LAZ	405758208	40576	2021-07-18T08:18:18.274	2021-07-18T09:57:51.990
52HN1.LAZ	129721115	12973	2021-07-18T08:55:45.781	2021-07-18T09:16:17.564
52HZ1.LAZ	47893229	4790	2021-07-18T08:18:44.655	2021-07-18T09:24:22.750
58BZ1.LAZ	126555	13	2021-07-17T18:15:41.793	2021-07-17T18:15:45.028
58BZ2.LAZ	465288888	46529	2021-07-17T16:33:25.484	2021-07-17T18:16:42.982
58CN2.LAZ	43503100	4351	2021-07-17T13:44:25.922	2021-07-17T14:08:01.259
58CZ1.LAZ	4878553	488	2021-07-17T14:09:59.761	2021-07-17T14:14:00.666
58CZ2.LAZ	911619345	91162	2021-07-17T12:36:30.413	2021-07-17T17:49:16.118
58DN1.LAZ	478118026	47812	2021-07-17T12:49:36.773	2021-07-17T18:15:43.161
58DN2.LAZ	973945919	97395	2021-07-17T15:41:03.717	2021-07-17T18:15:52.213
58DZ1.LAZ	1203404511	120341	2021-07-17T12:36:43.048	2021-07-17T18:01:35.994
58DZ2.LAZ	271841880	27185	2021-07-17T15:40:10.936	2021-07-17T16:44:43.362
58EN1.LAZ	146647506	14665	2021-07-18T08:08:31.584	2021-07-18T08:51:54.177
58EN2.LAZ	219602836	21961	2011-09-14T10:04:54.859	2021-07-18T08:52:33.667
58EZ1.LAZ	756272333	75628	2021-07-17T15:52:37.074	2021-07-18T08:39:59.819
58EZ2.LAZ	2046062	205	2021-07-18T08:08:24.472	2021-07-18T08:12:22.734
58GN1.LAZ	209492903	20950	2021-07-17T15:51:22.263	2021-07-17T16:47:15.864
68AZ2.LAZ	86104243	8611	2021-07-16T18:53:22.943	2021-07-17T12:26:52.647
68BN1.LAZ	633530467	63354	2021-07-17T11:18:15.848	2021-07-17T14:13:44.452
68BN2.LAZ	821769889	82177	2021-07-17T11:02:51.751	2021-07-17T14:13:47.375
68BZ1.LAZ	1672226821	167223	2021-07-16T17:27:34.948	2021-07-17T12:28:14.170
68BZ2.LAZ	92465634	9247	2021-07-17T11:01:57.490	2021-07-17T11:28:15.489
68CN2.LAZ	353706312	35371	2021-07-16T17:34:36.996	2021-07-16T18:22:47.111
68CZ2.LAZ	713159515	71316	2021-07-16T16:25:35.358	2021-07-16T18:21:50.939
68DN1.LAZ	743727023	74373	2021-07-16T16:41:09.949	2021-07-17T11:43:00.787
68DZ1.LAZ	288516711	28852	2021-07-16T16:25:49.759	2021-07-16T17:44:29.460
68EN1.LAZ	13900130	1391	2021-07-17T15:45:06.560	2021-07-17T16:01:10.189
69AN1.LAZ	54538839	5454	2021-07-16T16:57:59.802	2021-07-16T17:17:55.264
69AN2.LAZ	612779128	61278	2021-07-16T16:15:34.800	2021-07-16T17:19:01.011
69AZ2.LAZ	526023952	52603	2021-07-16T15:33:36.832	2021-07-16T16:34:17.514
69CN2.LAZ	577281222	57729	2021-07-16T15:35:13.108	2021-07-16T16:11:26.649
69CZ2.LAZ	1233360	124	2021-07-16T15:59:02.647	2021-07-16T16:09:07.788

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)